

**Analyse fahrerwirksamer Systemauslegungen und -störungen
eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung bei gleichzeitiger
Fahrerbeanspruchung durch eine Fahraufgabe**

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Alexander Wesp

aus Groß-Gerau

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski

Tag der Einreichung: 2. November 2010

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Januar 2011

Darmstadt 2010

D 17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt (TUD). Die behandelten inhaltlichen Fragestellungen der Dissertation wurden durch ein von der Adam Opel GmbH beauftragtes mehrjähriges Forschungsprojekt motiviert und ermöglicht.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, dem Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, für die hervorragende Betreuung der Arbeit und für die eingeräumten Freiheiten, die mir die Leitung des Forschungsprojekts erst ermöglichten. Der Dank erstreckt sich aber auch auf die immerwährende Bereitschaft zur kritischen fachlichen Diskussion.

Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Bert Breuer, dem ehemaligen Leiter von FZD, danke ich für seine kritischen Fragen und Hinweise in den Doktorandenseminaren.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski, Leiter des Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik, danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferats.

Für die laufende Unterstützung mit Material und Testgeländennutzung während der Forschungsarbeit und die angenehme und reibungslose Zusammenarbeit bedanke ich mich bei allen am Projekt beteiligten Mitarbeitern der Adam Opel GmbH, hier stellvertretend bei meinem direkten Projektbetreuer Gerd Bitz.

Danken möchte ich auch allen Mitarbeitern des FZD aus Werkstätten und Sekretariat für die zuverlässige und unbürokratische Unterstützung während meiner gesamten Dienstzeit. Zu erwähnen sind außerdem meine Kollegen, die durch ihr Interesse, Hilfsbereitschaft und Vertrauen zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Ein großer Dank gebührt meinen Studenten, die durch ihre studentischen Arbeiten und als wissenschaftliche Hilfskräfte einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders möchte ich mich bei meiner Frau Yvonne und meinen Kindern Carsten und Xenia bedanken, die durch Verzicht und nahezu unendliche Toleranz während der gesamten Arbeit mir eine starke Motivation waren.

Alexander Wesp

Dachau, November 2010

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Systemauslegung („Nutzen“).....	4
2.2 Fazit Systemauslegung.....	9
2.3 Systemstörung („Risiko“).....	10
2.4 Fazit Systemstörung	15
3 Untersuchungsbedarf und Ziele der Arbeit.....	16
4 Grundlagen und Modellvorstellung.....	17
4.1 Querdynamisches Fahrzeugmodell.....	17
4.2 Abschätzung der Phasendifferenz.....	19
4.2.1 Parameteranpassung.....	24
4.2.2 Konstante Gierversärkung.....	25
4.2.3 Fazit Beeinflussung der Phasendifferenz.....	27
4.3 Abschätzung der Störung der Fahrzeugbewegung.....	27
4.3.1 Fazit zur Störung der Fahrdynamik.....	31
4.4 Hypothesen.....	32
5 Methodik und Untersuchungswerkzeuge.....	36
5.1 Versuchsaufbau zur Systemauslegung.....	36
5.1.1 Versuchsplanung zur Systemauslegung.....	39
5.1.2 Fazit Versuche zur Systemauslegung.....	41
5.2 Versuchsaufbau zur Systemstörung.....	41
5.2.1 Versuchsplanung zur Systemstörung.....	43
5.2.2 Fazit Störungsversuche.....	46
5.3 Erfassung der Fahrerurteile.....	46
5.3.1 Systemauslegung.....	46
5.3.2 Systemstörung.....	50
5.3.3 Gütekriterien.....	52
5.3.4 Fazit zur Erfassung der Fahrerurteile.....	54
5.4 Probandenkollektiv.....	55
5.5 Untersuchungswerkzeug.....	56
5.5.1 Fazit Untersuchungswerkzeug.....	61
6 Ergebnisse zur Systemauslegung.....	62
6.1 Methodik der Auswertung.....	62
6.1.1 Auswertemethode der Fahrerbewertung.....	62
6.1.2 Auswertemethode der objektiven Daten.....	66

6.2 Systemauslegungen im Makrosinusversuch.....	67
6.2.1 Abhängigkeit der Fahrerbewertungen von der Versuchsreihenfolge.....	68
6.2.2 Fahrerbewertung im Makrosinusversuch.....	70
6.2.3 Validierung der Systemauslegung im Makrosinusversuch.....	72
6.2.4 Fazit Makrosinusversuch.....	76
6.3 Systemauslegung im Spurwechsel.....	76
6.3.1 Abhängigkeit der Fahrerbewertung von der Versuchsreihenfolge.....	77
6.3.2 Fahrerbewertung im Spurwechsel.....	79
6.3.3 Validierung der Systemauslegung im Spurwechsel.....	81
6.3.4 Fazit Spurwechselversuch.....	85
6.4 Fazit Systemauslegung.....	85
7 Systemstörungen.....	87
7.1 Störungen der Fahrzeugbewegung.....	87
7.2 Datenaufbereitung.....	89
7.3 Ergebnisdarstellung.....	91
7.4 Beidseitige Störungen durch das hintere Lenksystem.....	92
7.5 Beidseitige und einseitige Störungen durch das hintere Lenksystem.....	97
7.6 Beidseitige Störungen durch das hintere Lenksystem in Kurvenfahrt.....	102
7.7 Einseitige Störungen durch das hintere Lenksystem in Kurvenfahrt.....	104
7.8 Güte der Störungsuntersuchung.....	105
7.9 Fazit.....	106
8 Diskussion und Ausblick.....	108
9 Zusammenfassung.....	114
10 Anhang.....	116
10.1 Parameter des Versuchsfahrzeugs.....	116
10.2 Parameter der Hinterachslenkübersetzung.....	116
10.3 Messtechnik des Versuchsfahrzeugs.....	117
10.4 Fragebogen zur Systemauslegung.....	118
10.5 Ermittlung des Zeitverzugs im Makrosinusversuch.....	120
10.6 Objektive Störungsauswertung im Open-Loop.....	121
10.7 Störungsbewertung.....	123
10.8 Objektive Störungsauswertung und Fahrerbewertung im Closed-Loop.....	125
11 Literatur.....	129

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
a_y	m/s ²	Querbesehleunigung im Sehwerpunkt
\hat{a}_y	m/s ²	Querbesehleunigung im Sehwerpunkt (Laplace)
$a_{y,HA}$	m/s ²	Querbesehleunigung an der Hinterachse
$c_{\alpha v}$	N/rad	Achsschräglaufsteifigkeit der Vorderachse
$c_{\alpha h}$	N/rad	Achsschräglaufsteifigkeit der Hinterachse
i_s		(Mittlere) Lenkübersetzung zwischen Lenkrad und Vorderräder
$i_{s,theo}$		Notwendige Lenkübersetzung zwischen Lenkrad und Vorderräder für identische (dynamische) Gierverstärkung (passiver Hinterachse)
i_{s0}		Lenkübersetzung Vorderachse bei passiver Hinterachse
k		Lenkübersetzung zwischen Vorder- und Hinterräder
l	mm	Radstand
l_v	mm	Abstand Sehwerpunkt zu Vorderachse
l_h	m	Abstand Sehwerpunkt zu Hinterachse
m	kg	Fahrzeugmasse
m_{HA}	kg	Anteil der Hinterachse an der Fahrzeugmasse
p		Anzahl der Systemauslegungen (Untersuchungstupel)
n_i		Stichprobenanzahl eines Merkmals
r_i		Mittlerer Rang (der Fahrerbewertungen)
t		Anzahl gleicher Bewertungen eines Merkmals
v	m/s, km/h	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{ch}	m/s	Charakteristische Geschwindigkeit
F_{xv}, F_{xh}	N	Längskräfte der Vorder- und Hinterachse

VIII

Symbol	Einheit	Beschreibung
F_{yv}, F_{yh}	N	Querkräfte der Vorder- und Hinterachse
H_{emp}		Prüfgröße der Varianzanalyse (bei ordinal skalierten Merkmalen)
B		Korrekturgröße der Varianzanalyse (gleiche Fahrerbewertungen)
N		Anzahl Stichproben
$QS_{Kombinationen}$		Summe der Quadratsummen Systemauslegungsbewertungen
QS_{Total}		Quadratsumme aller Quadratsummen
α		Signifikanzniveau
α_v	°, rad	Achsschräglaufwinkel der Vorderachse
α_h	°, rad	Achsschräglaufwinkel der Hinterachse
β	°, rad	Schwimmwinkel im Schwerpunkt
$\dot{\beta}$	°/s, rad/s	Schwimmwinkelgeschwindigkeit
$\hat{\beta}$	°, rad	Schwimmwinkel (Laplace)
δ_v	°, rad	Radlenkwinkel der Vorderachse
δ_h	°, rad	Radlenkwinkel der Hinterachse
$\hat{\delta}_v$	°, rad	Radlenkwinkel der Vorderachse (Laplace)
$\hat{\delta}_h$	°, rad	Radlenkwinkel der Hinterachse (Laplace)
ρ	1/m	Krümmung
σ_f	1/s	Abklingkonstante des Fahrzeugs bei fixiertem Lenkrad
$\hat{\sigma}^2$		Empirische Varianz
τ	s	Zeitverzug zwischen Querbeschleunigung und Gierrate
τ_{ay}, τ_{ψ}	s	Zeitverzögerungen der Querbeschleunigung und Gierrate
φ_{ay}	°	Phasenwinkel der Querbeschleunigung
φ_{ψ}	°	Phasenwinkel der Gierrate
$\Delta\varphi$	°	Phasendifferenz zwischen Querbeschleunigung und Gierrate

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\dot{\psi}$	°/s, rad/°	Gierrate
$\hat{\dot{\psi}}$	°/s, rad/°	Gierrate (Laplace)
ω	°, rad	Lenkradwinkelfrequenz, Radlenkwinkelfrequenz
ω_f	1/s	Ungedämpfte Eigenkreisfrequenz des Fahrzeugs bei fixiertem Lenkrad in z-Richtung
Θ	kgm ²	Gierträgheit des Fahrzeugs um die Hochachse

Abkürzungen

Abkürzungen	Beschreibung
4WS	Allradlenkung (4 Wheel Steering)
AFS	A ctive F ront S teering (elektrische Lenkwinkelüberlagerung der ZF-Lenksysteme GmbH)
AHK	A ktive H interachs- K inematik (Hinterachslenksystem, BMW AG)
ESC	E lectronic S tability C ontrol (Fahrodynamikregelsystem)
ESP	E lektronisches S tabilitäts p rogramm (Fahrodynamikregelsystem der Daimler AG)
HICAS	H igh C apacity A ctively C ontrolled S uspension (Fa. Nissan)
KBA	K raftfahrt- B undesamt
ProdHaftG	Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte
RWS	Hinterradlenkung (R ear W heel S teering)
SbW	S teer- b y- W ire
StVZO	S traßenverkehrs Z ulassungs o rdnung
ACC	A daptive C ruise C ontrol (Adaptive Geschwindigkeitsregelung)
ESM	Einspurmodell
ECE	E conomic C ommission for E urope (Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen)
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
GPS	G lobal P ositioning S ystem (globales Navigationssatellitensystem)
CAN	C ontroller A rea N etwork (asynchrones, seriellcs Bussystem zur Vernetzung von Steuergeräten im Automobil)
CDC	C ontinuous D amping C ontrol (elektronisch veränderbares Aufbau-dämpfersystem der ZF-Sachs)
ESAS	E lectric S teer A ssisted S teering (elektrische Lenkwinkelüberlagerung der Continental AG)
FHG	Freiheitsgrad

1 Einleitung

Kraftfahrzeuge unterliegen einer kontinuierlichen Anpassung an die Anforderungen des Marktes, wie andere Produkte auch. Die Modifikation der Kraftfahrzeuge beschränkt sich dabei nicht nur auf augenfällige Änderungen, die auch vom Laien wahrgenommen werden (z. B. Design), sondern auch auf technische Eigenschaften des Produkts. Umfangreiche technische Neuerungen, wie die Einführung eines neuen technischen Systems, werden nicht selten erst bei einer Neuauflage einer Baureihe umgesetzt. Mit den dazu notwendigen Investitionen in neue Systeme ist das Ziel verbunden, eine (zeitweise) Alleinstellung des Produkts auf dem Markt zu erreichen. Ein seit dem Jahr 2000 rückläufiger Trend der Neuzulassungen (Abbildung 1.1)¹ verstärkt zusätzlich den Innovationsdruck auf die Fahrzeughersteller und deren Zulieferer.

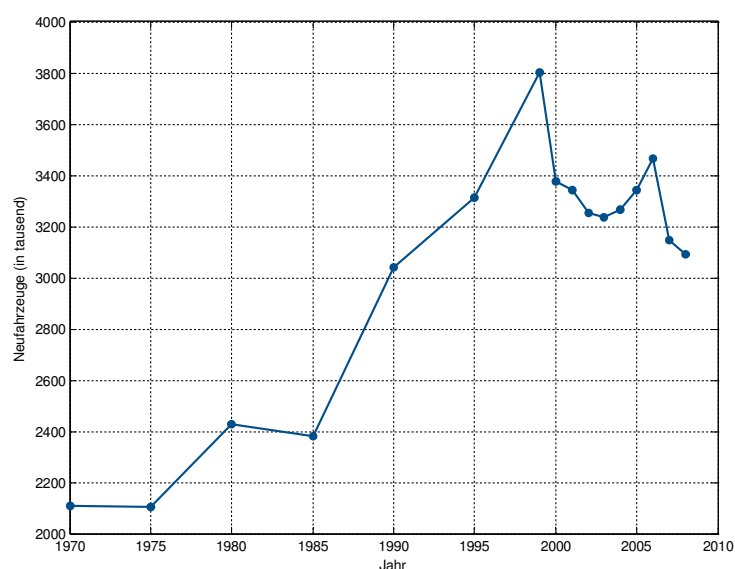


Abbildung 1.1: Neuzulassung von Pkw in Deutschland von 1970 bis 2008

Mit der Einführung einer neuen Technologie wird erwartet, dass sich eine Verbesserung des Gesamtsystems einstellt. Für Systeme zur Beeinflussung der Querdynamik werden Kriterien wie z. B. die Erhöhung der Fahrsicherheit oder des Komforts zum Nachweis einer Änderung (Nutzen) verwendet. Für ein neues zusätzliches System wird gefordert, dass die Gesamtsicherheit des Fahrzeugs nicht vermindert wird. Da jedoch mit jedem technischen System die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls steigt, müssen diese Systeme derart beschaffen und abgesichert sein, dass eine von ihnen ausgehende Fehlfunktion durch den Fahrer (als letzte Instanz) beherrschbar bleibt. Der Nutzen, der durch den Einsatz eines Systems erzielt werden kann, und das Risiko, das von einem System ausgeht, sind durch das System selbst miteinander verbunden. Für Fahrzeughersteller bedeutet dies, dass vor dem Einsatz eines Systems der kundenwirksame Nutzen nachgewiesen sein muss und Auswirkungen des

1 Kraftfahrt-Bundesamt (2008): Fahrzeugzulassungen - Neuzulassungen im Jahresverlauf seit 1970, S. 3

Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug im Fall einer Störung bekannt sein müssen, um den Einsatz der Investitionen zu rechtfertigen.

Neben neuartigen Systemen² werden auch bereits bekannte Systeme auf eine erneute Eignung geprüft. So ermöglichen leistungsfähige Aktoren im Bereich des Fahrwerks eine aktive Beeinflussung der Querdynamik (bei Berücksichtigung wirtschaftlichen Kriterien), wie die marktgängigen Beispiele der Überlagerungslenkung zeigen. Eine neue Technologie im Bereich der Querdynamik wurde 2003 mit der Überlagerungslenkung an der Vorderachse im Pkw eingeführt. In logischer Konsequenz der Querdynamik bietet sich die Hinterachslenkung zur Beeinflussung der Fahrzeugquerdynamik an, da nur mit diesem System die Fahrzeugreaktion in Quer- und Gierbewegung voneinander unabhängig beeinflusst werden kann.

Das System Hinterachslenkung bildet den Untersuchungsgegenstand der Arbeit. Auch wenn das System in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts schon einmal eingeführt wurde, so ist durch die größere Leistungsfähigkeit der Aktorik eine erneute Prüfung zur Verwendung im Fahrzeug gerechtfertigt.

2 z. B. Fahrerassistenzsysteme wie z. B. ACC (Adaptive Cruise Control) oder Spurverlassenswarner werden hier als neuartig verstanden, da die Systeme die Umwelt des Fahrzeugs in ihre Regel- und Steuerungselemente einbeziehen.

2 Stand der Technik

Eine Hinterachslenkung bietet durch den zusätzlichen Freiheitsgrad der gelenkten Hinterräder die Möglichkeit, Fahrzeugkonzepte mit langen Radständen zu realisieren, die durch den begrenzten Einschlagwinkel der Vorderräder nicht zulässig sind, da ein gesetzlich vorgeschriebener Wendekreis von 12,5 m eingehalten werden muss.^{3,4} Für den Einsatz einer zusätzlichen Hilfslenkung an der Hinterachse spricht auch, dass im Rangierbereich durch einen gegensinnigen Einschlag der Hinterräder der Wendekreis des Fahrzeugs verringert werden kann.

Neben der Erfüllung der zulassungsrechtlichen Voraussetzungen für Fahrzeuge mit großen Radständen ermöglicht eine Hinterachslenkung auch eine Erhöhung der Stabilität: Im Fall eines Ausweichens bei höheren Geschwindigkeiten kann eine so hohe Gierrate des Fahrzeugs aufgebaut werden, die durch die Reifen nicht mehr ausreichend schnell reduziert wird und zum Verlust der Stabilität des Fahrzeugs führt. Ein gleichsinniges Mitlenken der Hinterräder reduziert die Gierrate während des Ausweichvorgangs. Die Fahrzeugreaktion wird so für den Fahrer vorhersehbarer, da ein Schleudern des Fahrzeugs durch das Ausweichmanöver nicht erwartet wird.⁵ Durch die Möglichkeit die Bewegungsrichtung des Fahrzeughecks durch proaktives Lenken der Hinterräder gezielt zu beeinflussen, kann mithilfe einer Hinterachslenkung auch einer Untersteuertendenz entgegengewirkt werden. Die Kontrolle eines untersteuernden Fahrzeugs ist aufgrund der ausgeschöpften Vorderachsquerkraft durch die Lenkung der Vorderachse kaum möglich. Die Hinterachslenkung kann so zur Erhöhung der Fahrzeugstabilität beitragen und gleichzeitig die Fahrzeugreaktion durch den zusätzlichen Freiheitsgrad in Grenzen modifizieren.

Bedingt durch die hohe Ausstattungsrate der Neufahrzeuge mit Electronic Stability Control (ESC) kann eine Stabilisierung des Fahrzeugs durch das Bremssystem als Standardausstattung angesehen werden. Mit dem Einsatz einer Hinterachslenkung steht dann ein weiteres System zur Kontrolle der Fahrzeugstabilität zur Verfügung. Der Wirkmechanismus der beiden Systeme ist jedoch unterschiedlich: Bei einem Fahrdynamikeingriff des ESC-Systems wird ein Giermoment über die Längskräfte der Räder aufgebracht und die Fahrzeuggeschwindigkeit durch den Bremseneingriff reduziert. Eine Hinterachslenkung erzeugt dagegen das Giermoment über die Querkkräfte der hinteren Räder. Aufgrund des geringen Anteils der Hinterachsquerkkräfte in Fahrzeuginnenrichtung ist der Einfluss auf die Geschwindigkeit gering. ESC-Systeme reduzieren durch die Längskräfte der gebremsten Räder die Fahrzeuggeschwindigkeit und damit gleichzeitig den Seitenkraftbedarf (Abbau von v^2). Beide Systeme bringen ein Moment auf die Fahrzeughochachse auf. Die Hinterachslenkung kann das ESC-System aber nicht ersetzen, da die darstellbaren Giermomente abhängig von der Querbeschleunigung und

3 StVZO, § 32d Kurvenlaufeigenschaften

4 Herold et al. (2008): Die Integral Aktivlenkung, S. 106

5 Donges (1993): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur Aktiven Sicherheit im Straßenverkehr (clone), S. 277f

Schwimmwinkel⁶ des Fahrzeugs sind. Für hohe Querbeschleunigungen zeigt Schiebahn in einer Vergleichsrechnung, dass durch ein ESC-System deutlich größere Giermomente als durch eine Hinterachslenkung aufgebracht werden können.⁷ In unterschiedlichen Fahrmanövern, wie Ausweichen, Lastwechsel, Beschleunigen und Verzögern in Kurvenfahrt wird eine höhere Stabilisierung durch ein ESC-System gegenüber der Hinterachslenkung in Simulationsrechnungen aufgezeigt.⁸ Der Nutzen der Hinterachslenkung im Bereich der Stabilisierung liegt bei schnellen Ausweichmanövern in der Reduktion und Dämpfung der Gierbewegung.

2.1 Systemauslegung („Nutzen“)

Eine Berechnung am Einspurmodell⁹ zeigt, dass durch das Anlenken der Hinterräder die Bewegungsgrößen des Fahrzeugs nicht nur in der Amplitude, sondern auch in ihrem zeitlichen Zusammenhang stark beeinflusst werden können (vgl. Ergebnisse der Beispielrechnung in den Abbildungen 2.1 und 2.2).¹⁰

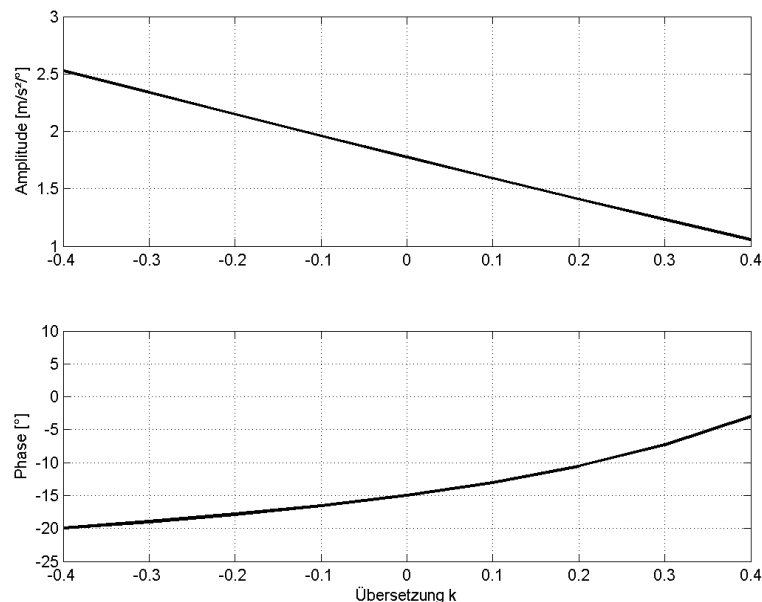


Abbildung 2.1: Einfluss der Lenkübersetzung k zwischen Hinter- und Vorderachse auf die Amplitude und Phase der Querbeschleunigung. Das Amplitudendiagramm ist auf den Lenkwinkel der Vorderachse bezogen.

Der zeitliche Zusammenhang der Fahrzeugreaktion auf die Eingabe des Fahrers am Lenkrad ist ein wichtiges Kriterium der Fahrzeugbewertung. Für eine gute Fahrzeugbewertung wird erwartet, dass ein Fahrzeug aus der Geradeausfahrt eine Reaktion ohne zeitliche Ver-

6 Winkel zwischen der Fahrzeuglängsachse und der Horizontalgeschwindigkeit des Fahrzeugs im Schwerpunkt.

7 Schiebahn et al. (2007): Yaw Torque Control for Vehicle Dynamics Systems, S. 118

8 Beiker (2000): zusammenwirkende Regelsysteme, S. 106f

9 Vgl. Kapitel 4.1.

10 Für die Beispielrechnung werden Parameter des späteren Versuchsfahrzeugs angenommen. Die Berechnung erfolgt mit einer angenommenen Lenkfrequenz von 0,36 Hz bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h.

zögerungen aufweist¹¹ und im Spurwechsel dem vorgegebenen Lenkradwinkel ohne Phasenverzug folgt. Eine geringe Phase der Fahrzeugreaktionen schafft für den Fahrer eine zeitliche Handlungsreserve, sodass er die Fahrzeugbewegung weniger antizipieren muss und damit geringer beansprucht wird.¹² Mit kleiner werdender Phase der Fahrzeugbewegungen auf die Lenkeingaben wird dem Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug eine verbesserte Leistung postuliert.¹³

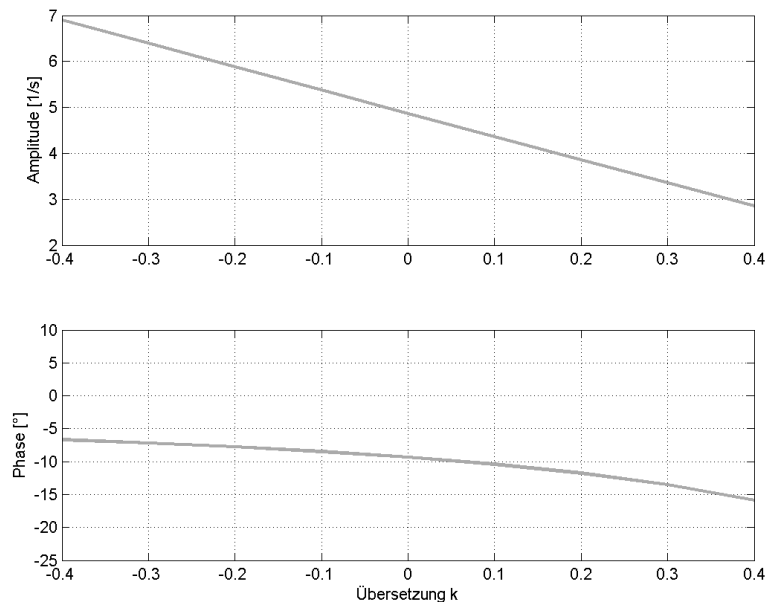


Abbildung 2.2: Einfluss der Lenkübersetzung k zwischen Hinter- und Vorderachse auf die Amplitude und Phase der Gierrate. Das Amplitudendiagramm ist auf den Lenkwinkel der Vorderachse bezogen.

Eine Änderung der Querbefleunigung erfolgt bezogen auf den Lenkradwinkel bei gleichsinnigem Lenkeinschlag früher gegenüber einem gegensinnigem Lenkeinschlag, wenn die Hinterräder in Richtung der Vorderräder einschlagen. Gleichzeitig verringert sich damit aber auch der Betrag der Gierrate, was zu einer geänderten Gierverstärkung führt. Das in stationären Fahrzuständen entstehende Verhältnis zwischen der Gierrate und dem vom Fahrer aufgebrauchten Lenkradwinkel (stationäre Gierverstärkung) stellt ebenfalls ein wichtiges Kriterium der Fahrzeugauslegung dar (siehe Gleichung 2.1).¹⁴

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_v}_{(stat)} = \frac{\frac{v}{l}(1-k)}{1 + \left(\frac{v}{v_{ch}}\right)^2} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

11 Heißing et al. (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens, S. 73

12 Weir et al. (1978): Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data, S. 10f

13 Nakaya et al. (1982): Effects of Vehicles Yaw and Lateral Acceleration Responses on Drivers Control Performance, S. 109.6

14 Bisimis et al. (1977): Lenkwinkel-Sprung und Übergangsverhalten von Kraftfahrzeugen, S. 585

$$k = \frac{\delta_h}{\delta_v} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Gleichung 2.1 zeigt den Einfluss des hinteren Lenkwinkels (hier ausgedrückt durch die Lenkübersetzung k , siehe auch Gleichung 2.2) auf die Gierrate. Der Einfluss des Hinterradlenkwinkels auf die Gierverstärkung veranlasste Berkefeld in einer Studie, das Übersetzungsgesetz der Hinterachse in dem dort eingesetzten Versuchsfahrzeug derart anzupassen, dass eine größere Gierverstärkung als im Fall einer vollständigen Kompensation des Schwimmwinkels entsteht. Durch diese Anpassung wurde eine verbesserte Bewertung der Fahrzeugreaktion (Agilität) erreicht.^{15,16} Eine Anpassung des Lenkradwinkels durch eine variable Lenkübersetzung wurde von Berkefeld nicht vorgenommen. Somit fehlt ein Nachweis bzgl. des Einflusses der Gierverstärkung und Phasenbeziehung auf die Bewertung (Agilität). Die von Fahrern bevorzugte Gierverstärkung konnte Stamer in zahlreichen Simulatorversuchen im doppelten Spurwechselversuch identifizieren. In der Studie konnte eine bevorzugte stationäre Gierverstärkung von 0,4 bis 0,44 1/s (bezogen auf den Lenkradwinkel) ermittelt werden.¹⁷

Die Größe und die Phasenbeziehung der Fahrzeugbewegungsgrößen haben auch einen Einfluss auf das Lenkgefühl. Für die Untersuchung des Lenkgefühls wurde in den 1990er Jahren von Toyota ein Fahrzeug mit einer Steer-by-Wire Vorderachslenkung und einer elektrischen Hinterachslenkung eingesetzt, mit dem Ziel, den Zusammenhang der Fahrzeugantwort auf das Lenkgefühl zu untersuchen.¹⁸ Bei diesem Fahrzeug konnten die Lenkradübersetzung, das Lenkradmoment und die Fahrzeugreaktion frei eingestellt werden. Bei konstanter Gier- und Lenkmomentverstärkung wurden im doppelten Spurwechsel unterschiedliche Kombinationen der Zeitkonstanten von Querschleunigung und Gierrate untersucht. Bezüglich des Zeitverhaltens der Fahrzeugantwort kamen Hisaoka et al. zu dem Ergebnis, dass die Belastung des Fahrers geringer wird, wenn die Differenz der Phasen (Gleichung 2.3)¹⁹ aus Querschleunigung und Gierrate Null ist (Phasengleichheit). Aus der Studie geht nicht hervor, mit welchem Fahrerkollektiv die Erkenntnisse gewonnen wurden.

$$\Delta \varphi = \varphi_{ay} - \varphi_{\dot{\psi}} \quad (\text{Gl. 2.3})$$

Zu einer ähnlichen Aussage kommt eine Studie der Firma Nissan, die unterschiedliche Lenkstrategien einer Hinterachslenkung (Super-HICAS) bezüglich des subjektiv empfundenen Ansprechverhaltens untersucht. Die Autoren kamen hier zu der Erkenntnis, dass der Absolutwert der Phasendifferenz nahe null sein sollte.²⁰ Die Phasengleichheit von Querschleunigung und Gierrate hat zur Konsequenz, dass die Schwimmwinkelgeschwindigkeit

15 Berkefeld (1991): Theoretische Untersuchung zur Vierradlenkung

16 Berkefeld, Seifert (1992): Four Wheel Steering - Handling and Disturbance Compensation on Surfaces with Various Friction Conditions

17 Stamer (1997): Ermittlung optimaler Pkw-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung, S. 108

18 Hisaoka et al. (1996): A Study on Desirable Steering Response and Steering Torque for Driver's Feeling, S. 301

19 Vgl. auch Gleichungen 4.11 und 4.12, Kapitel 4.2.

20 Kuroki et al. (1991): HICAS: Nissans Vierradlenkungstechnologie, S. 235

und damit der Schwimmwinkel Null sein muss.²¹ Welche minimale Phasendifferenz aus Querbesehleunigung und Gierrate von Fahrern noch wahrgenommen wird, wurde in diesen Versuchen nicht untersucht.

Die Phasendifferenz von Querbesehleunigung und Gierrate in Abhängigkeit der Lenkfreqenz ist für unterschiedliche Lenkübersetzungen k der Hinterachse in Abbildung 2.3 beispielhaft dargestellt.²²

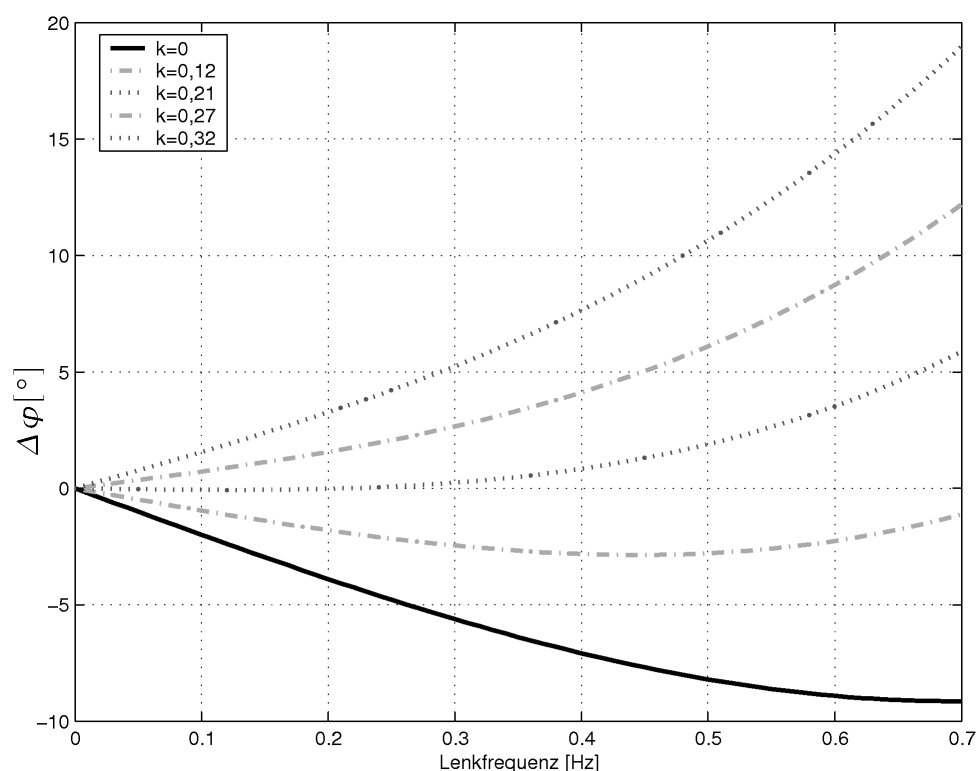


Abbildung 2.3: Berechnete Phasendifferenz zwischen der Querbesehleunigung und der Gierrate für unterschiedliche Übersetzungen k zwischen Hinter- und Vorderachse für eine Geschwindigkeit von 80 km/h.

In einer Zusammenfassung über die bis dato zahlreichen Veröffentlichungen zur Hinterachslenkung wird der Vorteil einer Hinterachslenkung bei untersteuernden Fahrzeugen unterstrichen und die Möglichkeit einer geringen Phasendifferenz zwischen Querbesehleunigung und Gierrate als wünschenswerte Eigenschaft von Sharp herausgestellt, ohne dies näher zu begründen.²³

Die Identifikation eines optimalen Übertragungsverhalten eines Fahrzeugs wurde von Stamer durch Simulatorversuche im doppelten Spurwechsel bei 60 km/h mit über 100 Probanden ermittelt. In einer Vielzahl von Versuchswiederholungen hatten die Fahrer die Möglichkeit,

21 Mathematisch folgt aus der Integration der Schwimmwinkelgeschwindigkeit nicht zwingend ein Schwimmwinkel von null. Mit Rücksicht auf ein symmetrisches Fahrverhalten kann aber von einem Schwimmwinkel von null ausgegangen werden.

22 Für die Beispielrechnung werden Parameter des späteren Versuchsfahrzeugs angenommen. Die Berechnung berücksichtigt eine Auslegungslenkfreqenz von 0,36 Hz (siehe Kapitel 10.1).

23 Sharp et al. (1988): Controlled Rear Steering for Cars - A Review, S. 154

immer nur einen Parameter der Übertragungsfunktionen einzustellen und die daraus resultierende Fahrzeugdynamik gegenüber einer Referenzdynamik zu bewerten. Anhand der gewählten Parameterwerte wurde ermittelt, dass ein Übertragungsverhalten mit einer identischen Peak-Response-Time von Querschleunigung und Gierrate am besten bewertet wurde.²⁴ Identische Peak-Response-Time der Querschleunigung und Gierrate sind gleichbedeutend mit einer Phasendifferenz von null.

Mithilfe eines Experimentalfahrzeuges wurden von Redlich in vergleichbaren Versuchen in doppelten Spurwechseln bei 80 km/h von 14 Probanden mehrere Lenkstrategien einer Hinterachslenkung gegen eine Referenzlenkstrategie verglichen. Die beste Bewertung erhielt eine Phasenwinkelsteuerung, die für eine konstante Lenkfrequenz eine identische Phase von Querschleunigung und Gierrate bezogen auf den Lenkwinkel der Vorderräder sicherstellt. Aufgrund der Ergebnisse wurde von dem Autor gefolgert, dass die Fahrer einen nahezu gleichzeitigen Aufbau von Querschleunigung und Gierrate bevorzugen.²⁵

Die Phasenwinkelsteuerung war das Ergebnis einer Voruntersuchung der Firma Mazda, die den Zusammenhang von Handling und Stabilität im Vorfeld einer Serienhinterachslenkung aufzeigen sollte. In der Untersuchung wurde das Übersetzungsverhältnis k von Hinter- zu Vorderachse von -1 bis +1 schrittweise variiert (die Schrittweite ist nicht angegeben). Die Fahrer mussten bei 50 km/h in einem gewundenen Parcours und bei 100 km/h in einem einfachen Spurwechsel die Fahrzeugreaktionen bewerten. Dabei zeigte sich, dass im gewundenen Parcours eine Lenkübersetzung von $k = -0,2$ und im einfachen Spurwechsel eine Lenkübersetzung von $k = 0,2$ die besten Bewertungen hervorrief. Eine Analyse der objektiven Daten zeigte, dass die Phasendifferenz zwischen Querschleunigung und Gierrate den größten Erklärungsbeitrag zu den subjektiven Bewertungen liefert.²⁶ Das Versuchsdesign berücksichtigt jedoch nicht den Einfluss der Gierverstärkung, sodass der kausale Zusammenhang zwischen der Phasengleichheit von Querschleunigung und Gierrate und den subjektiven Bewertungen nicht sicher erbracht werden kann. Es muss neben der geringen Stichprobengröße von nur vier Teilnehmern berücksichtigt werden, dass sich die Ergebnisse auch aufgrund des geänderten Lenkradwinkelaufwands ergeben haben könnten. Die im Versuch erzeugte Fahrzeugreaktion wird im Vergleich zu Fahrzeugen, die ausschließlich über die Vorderachse gelenkt werden, positiv bewertet.²⁷

Die Querschleunigung und Gierrate haben eine von dem Manöver abhängige Bedeutung. In einem Simulator konnte die Querbewegung und Drehbewegung um die Hochachse des Fahrzeugs unabhängig voneinander gesperrt werden, sodass das Fahrzeug nur seitlich verfahren oder nur um die Hochachse gedreht werden konnte. In einem Ausweichmanöver und einem Test, der eine Überlandfahrt simuliert, wurden bei konstanter Gierverstärkung unterschied-

24 Stamer (1997): Ermittlung optimaler Pkw-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung, S. 86f

25 Redlich (1994): Objektive und subjektive Beurteilung aktiver Vierradlenkstrategien, S.119

26 Takiguchi et al. (1986): Improvement of Vehicle Dynamics by Vehicle-Speed-Sensing Four-Wheel Steering System, S.4

27 Los et al. (1987): Konstruktion und Entwicklung eines Fahrzeugs mit mikroprozessor-geregelter Allradlenkung, S. 250

liche Übersetzungsverhältnisse zwischen Hinterachse und Vorderachse untersucht.²⁸ Die Tests der drei Versuchspersonen zeigen, dass die beste Leistung des Fahrer-Fahrzeug-simulator-Systems erreicht wird, wenn das Übersetzungsverhältnis positiv ist. Die Tests wurden bei Geschwindigkeiten von 40, 60 und 80 km/h durchgeführt. Sano et al. zeigen auf, dass die Querschleunigung die wichtigste Bewegungsgröße beim Spurwechsel darstellt, während bei normalen Fahrten die Gierrate für den Fahrer die wichtigsten Informationen über den Fahrzeugbewegungszustand liefert. Die Bedeutung der Querschleunigung in einem moderaten Spurwechsel konnte durch spätere Feldversuche bestätigt werden.²⁹ Von den Autoren wurde eine mechanische Lösung zur geschwindigkeitsabhängigen Übersetzung gefunden, die in stationärer Kurvenfahrt einer vollständigen Kompensation des Schwimmwinkels sicherstellt. In Slalomversuchen wurde bei unterschiedlichem Pylonenabstand von 10, 12,5, und 15 m bei Geschwindigkeiten von 28 bis 40 km/h diese Systemauslegung von zwei Probanden bewertet. Die in den Versuchen aufzubringende Lenkwinkelfrequenz betrug zwischen 0,37 und 0,4 Hz. Die beiden Versuchsteilnehmer bestätigten eine leichtere Kontrollierbarkeit und eine geringere Beanspruchung dieses Fahrzeugs gegenüber einem Standardfahrzeug.³⁰

Die unterschiedliche Gewichtung der beim Fahren zur Verfügung stehenden Informationen war auch Untersuchungsgegenstand im doppelten Spurwechsel, die auch mit einem allradgelenkten Fahrzeug zur Generierung unterschiedlicher Bewegungsantworten von Kudritzki durchgeführt wurde.³¹ Anhand der subjektiven Bewertungen und aufgezeichneter Bewegungsgrößen des Fahrzeugs konnte eine Korrelation zwischen der Bewertung und fahrdynamischen Kennwerten durch acht unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen und vier Fahrer hergestellt werden. Wichtigste Größen der Korrelation waren Kennwerte des Lenkradwinkels und der Gierbeschleunigung. In parallelen Simulatorversuchen wurden der Lenkradwinkel und Kurswinkel³² als wichtigste Kennwerte identifiziert. Der Einfluss des Lenkradwinkels wurde in der Korrelationsgleichung berücksichtigt. Wie auch in den vorherigen Studien wurde auch hier keine konstante Gierverstärkung der Fahrzeugauslegung in den Versuchen gewährleistet. Als eine weitere wichtige Information für den Fahrer wird die Querschleunigung identifiziert.³³

2.2 Fazit Systemauslegung

Mit einer Hinterachslenkung (RWS³⁴) können Querschleunigung und Gierrate (in Grenzen) unabhängig voneinander beeinflusst werden. Die RWS hat damit das Potenzial, die Fahr-

28 Sano et al. (1979): The Effect of Improved Vehicle Dynamics on Drivers Control Performance

29 Sano et al. (1986): Four Wheel Steering System with Rear Wheel Steer Angle Controlled as a Function of Steering Wheel Angle

30 Sano et al. (1986): Four Wheel Steering System with Rear Wheel Steer Angle Controlled as a Function of Steering Wheel Angle, S. 12

31 Kudritzki (1992): Korrelation zwischen objektiven und subjektiven Daten aus dem Fahrversuch

32 Der Kurswinkel beschreibt die Richtung der Fahrzeugbewegung in einem ortsfesten Koordinatensystem. Der Kurswinkel ist die Summe aus Gierwinkel und Schwimmwinkel.

33 Kudritzki (1989): Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens, S.9,

34 Engl.: Rear-Wheel-Steering

stabilität durch Kontrolle des Schwimmwinkels und der Schwimmwinkelgeschwindigkeit zu erhöhen, insbesondere in untersteuernden Fahrsituationen³⁵ und tritt damit im unteren Dynamikbereich³⁶ in Konkurrenz zum ESC-System. Vorschläge, validierte Lösungen und in der Praxis bewährte Konzepte zur Stabilisierung eines Fahrzeugs durch die Hinterachslenkung sind umfangreich in der Literatur vorhanden. Diese Thematik stellt, aufgrund der guten wissenschaftlichen Grundlage, nicht den Kern der Arbeit dar. Anhand der analysierten Literatur konnte jedoch kein Nachweis erbracht werden, welche physikalische Größe für die positive Bewertung einer Hinterachslenkung durch die Fahrer verantwortlich ist: die Gierverstärkung oder die Phasendifferenz aus Querschleunigung und Gierrate. In allen identifizierten Quellen wurde dieser Einfluss unterbewertet bzw. vernachlässigt. In den Studien, in denen er berücksichtigt wurde, geschah dies nicht zur Identifikation der urteilsbestimmenden Bewegungsgröße beim Einsatz von Hinterachslenkung im Pkw.

2.3 Systemstörung („Risiko“)

Wird eine Hinterachslenkung am Markt in einem Fahrzeug angeboten, ist der Hersteller des Fahrzeugs im Schadensfall zum Nachweis der Beherrschbarkeit der von dem technischen System ausgehenden Störung durch den Fahrer verpflichtet. Da trotz aller technischen Absicherungen eine Restwahrscheinlichkeit eines Systemdefekts besteht, muss die Auswirkung des Fehlers durch eine *richtige* Handlung des Fahrers kompensiert bzw. auf ein unkritisches Maß reduziert werden können.³⁷ Die Hinterachslenkung eines Pkws gilt im Sinne der ECE-Regelung Nr. 79 als Zusatzlenkanlage, die nur zusammen mit einer Vorderachslenkung eingesetzt werden kann.^{38,39} Da die Lenkbarkeit des Fahrzeugs bei ausgefallener Hinterachslenkung durch die Vorderachslenkung gegeben ist, kann auf eine fehlertolerante Auslegung der Hinterachslenkung verzichtet werden. Ein Fail-Silent Verhalten der Hinterachslenkung (Abschaltung und Sperren des Lenkfreiheitsgrades) wird für Hinterachslenkungen als eine ausreichende Lösung angesehen.^{40,41}

Die gesetzliche Verantwortung des Herstellers für den entstehenden Schaden infolge einer Fehlfunktion⁴² steigert dessen Interesse am Nachweis der Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs während des Systemübergangs vom fehlerhaften in den sicheren Zustand. Eine Herausforderung bei der Untersuchung der Kontrollierbarkeit von Fehlfunktionen im Pkw liegt in der großen Varianz der Fahrerfahrungen und Fertigkeiten der späteren Nutzergruppe. Im

35 Herold et al. (2008): Die Integral Aktivlenkung, S. 107

36 Der untere Dynamikbereich eines Fahrzeugs wird durch die Fahrgeschwindigkeit bestimmt. Er zeichnet sich durch geringes Überspringen der Querschleunigung und Gierrate bei einem Lenkwinkelsprung aus.

37 Theis (2002): Das Steer-by-Wire System im Kraftfahrzeug - Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit, S. 27

38 Die ECE-Regelungen der *Economic Commission for Europe* sind technisch-einheitliche Vorschriften für Fahrzeuge, Teile und Fahrzeugausrüstungen, die in Europa und weiteren Teilnehmerstaaten angewandt werden.

39 ECE-R79 (Rev.2)

40 Braun, John (2003): Elektronisch geregelte Hinterachs-Lenkanlage RAS-EC für Nutzfahrzeuge

41 z. B. Schneider (1995): Konzipierung einer marktgerechten Stelleinheit als Aktuator einer aktiven Hinterradlenkung für Personenkraftwagen, S. 84

42 Vgl. ProdHaftG, §1 Haftung

Gegensatz zu anderen Verkehrssystemen, wie Flugzeug oder Eisenbahn, kann im Kraftfahrzeug auf kein spezielles Handlungsrepertoire der Fahrer zurückgegriffen werden, um die im Fehlerfall auftretenden Systemreaktionen beherrschen zu können. Dies ist nicht nur auf Störungen von Lenksystemen beschränkt, sondern kann auch bei plötzlich geändertem Fahrverhalten aufgrund einer Straßenzustandsänderung (trocken, nass) beobachtet werden, wobei die Fahrer teilweise keine oder eine unangemessene Reaktion zeigen.⁴³ Es wird daher gefordert, dass die technischen Systeme „fehlerverzeihend“ ausgelegt sind und der Fahrzeugzustand durch eine falsche Fahrerreaktion nicht noch weiter destabilisiert wird.⁴⁴ Eine Fail-Operational Auslegung der Hinterachslenkung (Funktionserfüllung auch im Fehlerfall) kann daraus nicht zwingend abgeleitet werden.

Für die Auswirkungen einer Störung des Lenksystems haben die Randbedingungen wie Fahrstreifenbreite, die den zur Verfügung stehenden Korrekturraum begrenzt, und die Fahrgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluss. Wie Open-Loop-Messungen⁴⁵ an Überlagerungslenkungen zeigen, hat die Fahrgeschwindigkeit einen Einfluss auf den wirksamen Radlenkwinkel, der infolge einer Störung des Lenksystems ausgeprägt wird.^{46,47} Der vom Fahrer benötigte seitliche Korrekturraum ist fahrerinterindividuell verschieden und wird im Wesentlichen vom Zeitpunkt der Kompensationsreaktion bestimmt.⁴⁸

Die Folgen einer Störung des vorderen Lenksystems auf das Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug wurde im Rahmen der Steer-by-Wire-Entwicklung (SbW) von Mercedes im Fahrsimulator untersucht.⁴⁹ In dieser Untersuchung wurde bei 60 Probanden ein Lenkwinkelsprung von $\pm 0,35^\circ$ und $\pm 0,5^\circ$ der Vorderräder bei 100 km/h aufgeprägt. Den Fahrern stand dabei eine Fahrbahnbreite von 3,5 m zur Kompensation der Fahrzeugstörung zur Verfügung. In weiteren Versuchen wurden ein Lenkwinkelsprung von $\pm 0,3^\circ$ und $\pm 0,4^\circ$ bei 150 km/h und einer Fahrstreifenbreite von 3,5 m auf dem linken Fahrstreifen einer Fahrbahn mit zwei Richtungstreifen und Mitverkehr durchgeführt. Die Aufgabe galt als nicht erfüllt, wenn die Fahrstreifenbegrenzung um mehr als 0,2 m überfahren wurde. Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h und einem Lenkwinkelsprung von $0,35^\circ$ hat keiner der 60 Fahrer das Kriterium überschritten. Bei einem Lenkwinkelsprung von $0,5^\circ$ haben 7 % der Fahrer das Kriterium verletzt. Für eine Versuchsgeschwindigkeit von 150 km/h verletzen 37 % der Fahrer das Kriterium bei Lenkwinkeln von $0,3^\circ$. Bei Lenkwinkelsprüngen von $0,4^\circ$ benötigen 34 % der Fahrer einen seitlichen Korrekturraum, der den Fahrstreifen um mehr als 0,2 m überschritt. Aus dem Bericht geht nicht hervor, ob gleichzeitig auch ein Sprung des Lenkradmoments

43 Förster (1991): Der Fahrzeugführer als Bindeglied zwischen Reifen, Fahrwerk und Fahrbahn, S. 5

44 van Zanten et al. (1999): Beherrschung der Querdynamik von Kraftfahrzeugen durch Bremseneingriff, S. 17

45 Open-Loop bedeutet hier, dass eine Fahrzeugreaktion ohne Einfluss des Fahrers untersucht wird.

46 Fuhr (2004): Vehicle Technology Aspects of a Safety Investigation Deriving Demands for Safety Functions of an Active Steering System

47 Wesp et al. (2008): Vehicle Motion In Case Of Failure of Superposition Steering Systems

48 Neukum et al. (2005): Bewertung der Funktionssicherheit aktiver Lenksysteme: ein Human Factor Ansatz

49 Freitag et al. (2001): Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen mit Steer-by-Wire Funktionalität

simuliert wurde, der den sehr schnellen haptischen Kanal⁵⁰ des Fahrers anspricht und das Untersuchungsergebnis dadurch beeinflusst.⁵¹ Da der Fokus der Untersuchung auf der SbW-Funktionalität liegt, kann aber davon ausgegangen werden, dass keine Änderung des Lenkmoments vorlag. Eine Erfassung der von den Fahrern bewerteten Störung ist nicht dokumentiert, sodass eine von den Fahrern noch akzeptierte Störung durch den Lenkwinkelsprung nicht ermittelt werden kann. Aus den Versuchen kann gefolgert werden, dass ein Lenkwinkelsprung von $\pm 0,35^\circ$ bei 100 km/h eine Kollision mit einer geringen Wahrscheinlichkeit zur Folge hat (20 cm eines Gegenfahrstreifens werden dennoch zur Kompensation der Störung benötigt). Eine höhere Geschwindigkeit führt bei identischer Störung zu größeren Querabweichungen, sodass bei Geschwindigkeiten von 150 km/h eine $0,3^\circ$ -Störung nicht mehr vertretbar ist.

In Versuchen zur Störungsuntersuchung von Überlagerungslenkungen wird neben der Erfassung der fahrdynamischen Daten eine zweistufige Störungsbewertungsskala zur Bewertung der fahrdynamischen Störung durch den Fahrer eingesetzt.⁵² Der erste Teil der Skala ist eine fünfstufige Ordinalskala, die eine Grobkategorisierung des Fahrerurteils erlaubt. In der zweiten Skala wird eine feinere Detaillierung des Fahrerurteils in insgesamt elf Stufen vorgenommen. Die Skala ist an beiden Enden durch „nicht bemerkt“ und „Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar“ verankert und erfüllt damit ein wichtiges Kriterium der Ratingskalen (Abbildung 2.4).⁵³

Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar	10
Gefährlichkeit	9
	8
	7
Störung des Fahrens	6
	5
	4
Spürbarkeit	3
	2
	1
Nichts bemerkt	0

Abbildung 2.4: Zweistufige Störungsbewertungsskala nach Neukum & Krüger

In kontrollierten Feldversuchen wurden den Versuchsteilnehmern unterschiedliche Lenkwinkelsprünge von $0,06^\circ$ bis $1,7^\circ$ durch die Überlagerungslenkung bei Geschwindigkeiten

50 Kafka-Lützow (1994): Möglichkeiten nicht-visueller Informationsaufnahme im Straßenverkehr, S. 114, tonischer Dehnungsreflex an Arm und Beinmuskulatur 35 bis 65 ms

51 Donges (1993): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur Aktiven Sicherheit im Straßenverkehr, S. 243f

52 Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien

53 Bortz, Döring (2006): Forschungsmethoden und Evaluation, S. 176ff

von 50, 80, 100 und 150 km/h aufgeschaltet. Um Fahrer einerseits zu einer Handlung zu motivieren und andererseits ein objektives Maß für die benötigte Querabweichung infolge einer Lenkstörung zu erhalten, wurden den 30 Versuchsteilnehmern im Blindversuch⁵⁴ die Lenksystemstörungen in Pylonengassen aufgeschaltet. Die Analyse der Störungen zeigt, dass die Fahrer Lenkwinkelsprünge mit zunehmender Geschwindigkeit und Störampplitude kritischer bewerten. Die Autoren konnten keine Abhängigkeit von Alters- oder Geschlechtsgruppen nachweisen. Ein Vergleichstest mit professionellen Testfahrern zeigt, dass die Gruppe der Testfahrer gleiche Störungen des Lenksystems kritischer als normal geübte Fahrer bewerten. Aus dem Untersuchungsergebnis für Lenksystemstörungen ist zu schließen, dass Lenkwinkelsprünge einer Überlagerungslenkung von 1° bei 50 km/h bis $0,8^\circ$ bei 100 km/h von Normalfahrern noch akzeptiert werden. Die Kompensation der Störung innerhalb der Pylonengasse rechtfertigt, dass die von den Fahrern noch akzeptierten Störungen auch als beherrschbar eingestuft werden können. Methodisch zeigen die Ergebnisse auf, dass zur Abschätzung einer noch zu kontrollierenden Störung die Störungseinschätzung des Fahrers mit erfasst werden muss. Bei einer ausschließlichen Berücksichtigung des Fahrstreifenkriteriums würden hier nur Störungen berücksichtigt, die im Sinne der Störungsbewertungsskala den kritischsten Fall (nicht zu kontrollierendes Fahrzeug) darstellen.

Eine fahrerwirksame Fehlfunktion einer Überlagerungslenkung kann der ungewollte aktive Stelleingriff, eine nicht ausreichende Verriegelung des zusätzlichen Lenkfreiheitsgrads (Überlagerungsmotor) oder ein ausbleibender elektrischer Stelleingriff sein.⁵⁵ Aus den Fehlfunktionen leiten Eckrich et al. drei Fehler ab, die untersuchungsrelevant sind: eine Abschaltung (Fail-Silent) ohne vorangegangenen Stellfehler, ein irreversibler Stellfehler mit anschließender Abschaltung des Lenksystems und einen reversiblen Stellfehler ohne Abschaltung. Für irreversible Stellfehler in Form eines Lenkwinkelsprungs wird anhand von Versuchen ermittelt, dass ein „Lenkwinkeloffsetsprung für den Fahrer unproblematisch ist, wenn der Stellfehler (...) kleiner als $1/v$ (...) bleibt“.^{56,57} Mit dieser Studie ist eine Grenzkurve für fahrerbeherrschbare irreversible Stellfehler am Rad erstmals identifiziert.

Zur besseren Übertragbarkeit der Ergebnisse der empirischen Störungsanalyse wird die Fahrerbewertung einer Systemstörung nicht mehr über Lenkwinkel, sondern über die Fahrdynamikgrößen maximale Querbeschleunigung und Gierrate aufgetragen.⁵⁸ Damit sind von Fahrern tolerierte Lenksystemstörungen fahrdynamischen Bewegungsgrößen zuordenbar. Als fahrdynamische Kennwerte wurden die maximale Querbeschleunigung und maximale Gierrate infolge einer Lenksystemstörung herangezogen, die vor der Kompensationsreaktion des Fahrers vorliegt. Als Grenzwerte einer noch tolerierten Störung wird eine maximale Gierrate von $4^\circ/\text{s}$ bei 50 km/h und $3^\circ/\text{s}$ bei 150 km/h von den Autoren angegeben.

54 Im Blindversuch ist vom Probanden zu bewertende Störung nur dem Versuchsbetreuer bekannt. Der Proband hat keinen Hinweis auf die zu bewertende Störung.

55 Eckrich et al. (2006): Das Sicherheitskonzept der BWM-Aktivlenkung, S. 319

56 Eckrich et al. (2002): Aktivlenkung - Anforderungen an Sicherheitstechnik und Entwicklungsprozess, S. 1172

57 Die Größengleichung setzt die Geschwindigkeit in km/h und den Radlenkwinkel in Radiant ins Verhältnis.

Der Radlenkwinkel (Stellfehler) wird als Störung der Fahrzeugbewegung aufgeschaltet (Störtenkwinkel).

58 Neukum et al. (2005): Bewertung der Funktionssicherheit aktiver Lenksysteme: ein Human Factor Ansatz

Eine allgemeingültige Aussage über die Akzeptanz einer Systemstörung (Lenkwinkelsprung an der Vorderachse infolge eines Fehlers der Überlagerungslenkung) wird durch eine Untersuchung von vier Fahrzeugen mit unterschiedlicher Dynamik erreicht.⁵⁹ Die Autoren untersuchten in dieser Studie irreversible Störaufschaltungen des Lenkwinkels mit insgesamt 86 normal geübten Fahrern bei Geschwindigkeiten von 50, 100 und 150 km/h. Die subjektiven Bewertungen der Störung der Fahrdynamik wurden mithilfe der Störungsbewertungsskala erfasst. Die in der Studie ermittelten Grenzwerte der Beherrschbarkeit eines Stellfehlers werden von 85 % der Versuchsteilnehmer erfüllt (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Von normal geübten Fahrern kontrollierbare irreversible Stellfehler in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

	Geschwindigkeit [km/h]		
	50	100	150
Max. Gierrate (Peak) [°/s]	4	3	2,5
Max Querbesehleunigung (Peak) [m/s²]	1,25		

Die ermittelten Grenzwerte zeigen, dass eine Störung der Fahrdynamik von bis zu 1,25 m/s² maximaler Querbesehleunigung (geschwindigkeitsabhängig) von den Probanden toleriert wird, wenn die maximale Gierrate bei 50 km/h einen Wert von 4 °/s, bei 100 km/h von 3 °/s und bei 150 km/h von 2,5 °/s nicht überschreitet. Infolge der großen Probandenanzahl und der Stichprobe an unterschiedlichen Fahrzeugen kommen Neukum und Krüger zum Schluss, dass eine Entscheidung über die Höhe einer kontrollierbaren Störung der Fahrzeugdynamik infolge irreversibler Lenkwinkelstörungen einer Überlagerungslenkung durch Open-Loop Versuche abgedeckt werden kann.

Analoge Versuche zu Ermittlung der von Fahrern akzeptierten Störungen der Fahrdynamik infolge einer Lenksystemstörung des hinteren Lenksystems konnten in der Literatur nicht identifiziert werden. Wegen der gesetzlichen Verantwortung des Herstellers wird angenommen, dass Fahrzeughersteller vor dem Einsatz einer Hinterachslenkung Versuche zu den Auswirkungen eines Ausfalls unternommen haben und unternehmen. Die Hinweise darauf sind allerdings spärlich. So wurde 1989 zu dem Hinterachslenksystem von BMW darauf hingewiesen, dass eine „hohe Zuverlässigkeit und Schutz vor gefährlichen Fehlern“⁶⁰ wichtige Entwicklungsziele für die Steuergeräte der AHK (Aktive-Hinterachs-Kinematik) sind. Weitere Ausführungen zur Klassifizierung der *gefährlichen* Fehler können der Publikation nicht entnommen werden.

Ein weiteres Indiz ist der Aufbau einer Fehlererkennung des Toyota-Allradlenksystems, das zeigt, dass eine kontinuierliche Überwachung des Allradlenksystems als notwendig erachtet

⁵⁹ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures

⁶⁰ Rauner (1991): Hard- und Software-Zuverlässigkeit von Steuergeräten für die aktive Hinterachskinematik, S.

wurde.⁶¹ Über eine empirische Erhebung über die Störungsauswirkung auf das Fahrer-Fahrzeug System gibt es in der Publikation keinen Hinweis.

Die aktuell am Markt für Pkw erhältlichen Systeme der Hinterradlenkungen besitzen einen elektromechanischen Aktor zum Aufbringen der Stellkräfte (Stand 2010). Je nach Konzept sind an der Hinterachse ein oder zwei Aktoren zum Aufbringen der Lenkkräfte eingesetzt. Für das Doppelaktorkonzept besteht die Möglichkeit eines selbstständigen Lenkeingriffs derart, dass eine Gesamtnachspur der Hinterachse eingestellt wird. In einer empirischen Untersuchung zur Optimierung der Fahrzeugantwort durch Fahrzeuge mit variabler Spureinstellung an der Hinterachse wird in Versuchen nachgewiesen, dass Fahrzeuge mit Nachspur an der Hinterachse durch normal geübte Fahrer schlechter zu beherrschen sind als solche mit Vorspur.⁶²

2.4 Fazit Systemstörung

Für eine Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs infolge einer Fehlfunktion der Hinterachslenkung liegen keine Erkenntnisse in der zugänglichen Literatur bezüglich von Fahrern maximal tolerierter Störungen vor. Für Überlagerungslenkungen an der Vorderachse existiert eine bewährte Methode zur Identifikation noch tolerierter Störungen der Fahrdynamik. Diese nutzt eine Erfassung der fahrdynamischen Bewertungsgrößen und des Fahrerurteils, woraus sich Grenzwerte noch tolerierter Störungen ableiten lassen.

Die Methode der Identifikation kontrollierter und von Fahrern noch tolerierter Störungen ist auf die Hinterachslenkung übertragbar. Eine Übernahme der ermittelten Grenzen ist aufgrund der Verschiedenartigkeit der Lenksysteme nicht möglich. Darüber hinaus bestehen bei der Hinterachslenkung unterschiedliche Aktorkonzepte (Einfach- und Doppelaktor), die bei Vorderachslenksystemen im Pkw so nicht vorkommen. Bei unterschiedlicher Aktorkonzeption sind daher Störungen durch nur ein Hinterrad möglich, die bei ungünstigen fahrdynamischen Bedingungen (z. B. bei Kurvenfahrt) ein nicht zu vernachlässigendes Störungspotenzial aufbringen können.

61 Yamaguchi et al. (1994): The Estimation of Ambiguous Change in 4WS Control System Using Failure Detection Filter

62 Kudritzki, Willumeit (1988): Rear Axle Steering by Variable Rear Wheel Toe: A Possibility to Optimize Transient Response of Automobiles from the Driver's View too, S. 1622

3 Untersuchungsbedarf und Ziele der Arbeit

Aus dem aktuellen Stand der Technik wird entnommen, dass Hinterachslenkungen zur Stabilisierung des Fahrzeugs erfolgreich eingesetzt werden können und eine große Anzahl an wissenschaftlichen Arbeiten verfügbar ist. Für einen Einsatz einer Hinterachslenkung mit einer Stabilisierungsfunktion (zusätzlich zum ESC-System) werden aber weitere durch den Kunden wahrnehmbare Funktionalitäten erwartet (kundenwirksame Funktion). Die bisher in der Literatur bescheinigte Akzeptanz und die Reduktion der Fahrerbeanspruchung können nicht eindeutig auf fahrphysikalische Größen zurückgeführt werden. Einflussreiche Größen sind hier die Gierverstärkung und Phasendifferenz zwischen Querbeschleunigung und Gierate. Beide werden durch die Hinterachslenkung direkt beeinflusst. Ein Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Wahrnehmung und Unterscheidung der Phasendifferenz durch normal geübte Fahrer in kontrollierten Feldversuchen nachzuweisen.

Um ein elektrisch kontrolliertes Lenksystem im Pkw einzusetzen, muss die fahrdynamische Auswirkung eines Fehlers durch den Fahrer kontrolliert werden können. Diese Kontrollierbarkeit setzt wiederum voraus, dass die maximale Größe einer durch den Fahrer noch zu kontrollierenden Störung bekannt sein muss. Auf dieser Basis ist es dann möglich, konkrete Anforderungen an die Hard- und Software der Lenkanlage zu formulieren. Da die zulässigen Größen in diesem Fall nicht bekannt sind, ist ein weiteres Ziel der Arbeit, diese Grenzen im Feldversuch mit normal geübten Fahrern zu bestimmen.

Zur Erreichung dieser Ziele wird durch eine theoretische Abschätzung die im Feldversuch mögliche Phasendifferenz bei Berücksichtigung versuchstechnischer Einschränkungen (Aktordynamik, limitierter Radlenkwinkel der Hinterräder) bestimmt (Kapitel 4.2). Zur Abschätzung der Störungsauswirkung werden die lenkwinkelinduzierten Störungen der Fahrdynamik ebenfalls rechnerisch im Vorfeld ermittelt, um eine wahrnehmbare Störung der Fahrzeugbewegung im Probandenversuch sicherstellen zu können (Kapitel 4.3).

Die versuchstechnische Umsetzung der zur Untersuchung der Fahrersensitivität bezüglich der Phasendifferenz zwischen Querbeschleunigung und Gierrate (Kapitel 5.1) leistet einen ebenso wichtigen Beitrag zur Zielerreichung, wie die Erfassung der Fahrerurteile (Kapitel 5.3). Eine vergleichbare Bedeutung hat zur Ermittlung noch kontrollierbarer Störungen der Fahrzeugbewegung die versuchstechnische Umsetzung der Störtenkwinkel (Kapitel 5.2).

Durch gezielte Versuche zur Ermittlung der Aktordynamik (Lenkaktoren der Vorderachse und der Hinterachse) wird ein wesentlicher Nachweis zur Eignung des Untersuchungswerkzeugs (Versuchsfahrzeug) zur gezielten und reproduzierbaren Darstellung von Phasendifferenzen und Störung der Fahrzeugbewegung im Feldversuch erbracht (Kapitel 5.5).

4 Grundlagen und Modellvorstellung

Das Verständnis und eine Abschätzung der zu erwartenden Änderung der Fahrdynamik durch Änderung des Hinterradlenkwinkels sind für die späteren Felduntersuchungen notwendig. Der Nachweis der Wirkhöhe ("Effektstärke") soll durch ein leicht nachvollziehbares Modell möglich sein und gleichzeitig die ausgewählten Fahrsituationen ausreichend gut vorhersagen. Für diesen Zweck ist eine Simulationsgüte ausreichend, die eine qualitative Unterscheidung der Haupteinflussfaktoren wie z. B. der Lenkübersetzung und Veränderung der Schräglaufsteifigkeiten der Räder zulässt. Die fahrdynamischen Auswirkungen eines Lenkeingriffes an der Hinterachse werden in dieser Arbeit daher durch ein Einspurmodell abgeschätzt. Ein lineares Einspurmodell erlaubt eine nachvollziehbare Abschätzung in ausreichender Qualität der zu erwartenden Fahrzeugbewegungen⁶³, die durch unterschiedliche Systemauslegungen oder Störungen der Hinterachslenkung hervorgerufen werden.

4.1 Querdynamisches Fahrzeugmodell

Eine lineare Beschreibung der ebenen Fahrzeugbewegung wird durch drei unabhängige Übertragungsfunktionen zwischen dem Eingang eines Fahrzeugs und den Ausgangsgrößen, hier repräsentiert durch die Bewegungsgrößen Querbeschleunigung, Gierrate und Schwimmwinkel, erreicht. Durch die gewählte Darstellung der Übertragungsfunktion ist eine theoretische Untersuchung sowie eine Validierung des Modells an experimentell ermittelten Bewegungsgrößen einfach darstellbar.

Die Übertragungsfunktionen werden aus den Gleichungen der Kräftebilanz in Fahrzeugquer-richtung und der Momentenbilanz im Schwerpunkt des Fahrzeugs abgeleitet. Abbildung 4.1⁶⁴

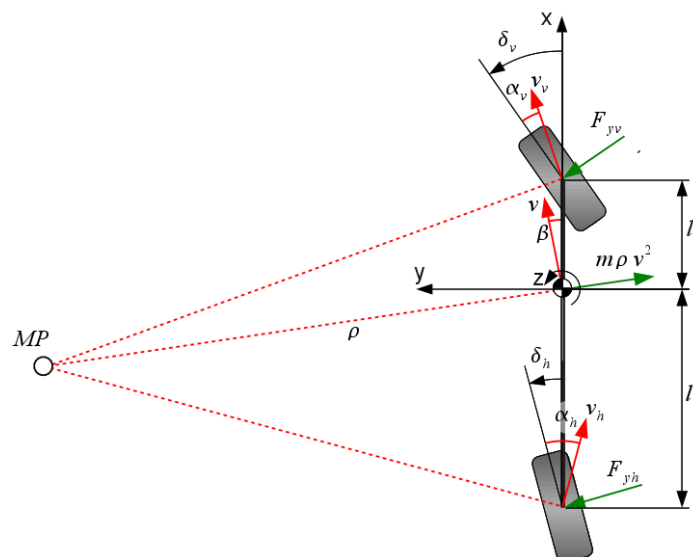


Abbildung 4.1: Winkel, Kräfte und geometrische Abmessungen des Einspurmodells

63 vgl. Ammon (1997): Modellbildung und Systementwicklung in der Fahrzeugdynamik, S. 46

64 nach Mitschke, Wallentowitz (2003): Dynamik der Kraftfahrzeuge, S. 548ff

zeigt die wirksamen Kräfte und geometrischen Abmessungen des verwendeten Einspurmodells im Freikörperbild. Bei der Erstellung des Einspurmodells werden die Räder einer Achse zu einem gemeinsamen Rad zusammengefasst und die Schräglauftiefigkeiten der Räder zu der Schräglauftiefigkeit einer Achse verschmolzen.

Ausgehend von dem Kräftegleichgewicht in Fahrzeugquerrichtung (siehe Gleichung 4.1) und dem Momentengleichgewicht um den Fahrzeugschwerpunkt (Gleichung 4.2) werden mit der Annahme einer linearisierten Winkelbeziehung⁶⁵ und der linearisierten Vorder- (Gleichung 4.3) und Hinterachsquerkraft (Gleichung 4.4) die Ausgangsgleichungen vereinfacht. Dabei werden die Achsquerkräfte mithilfe der Achsschräglauftiefigkeiten ausgedrückt. Bei der Umformung wird der Zusammenhang zwischen Gierrate, Schwimmwinkelgeschwindigkeit und Querbewegung genutzt (Gleichung 4.5). Die in Fahrzeugquerrichtung wirksame Komponente der Luftwiderstandskraft wird in den Berechnungen vernachlässigt, da der Anteil der Luftwiderstandskraft bezüglich der zu untersuchenden Phasendifferenzen und den Störungen durch die Lenksysteme klein ist.

$$-m \rho v^2 \cdot \cos \beta + m \cdot \dot{v} \cdot \sin \beta + F_{yh} \cdot \cos \delta_h + F_{yv} \cdot \cos \delta_v + F_{xh} \cdot \sin \delta_h + F_{xv} \cdot \sin \delta_v = 0 \quad (\text{Gl. 4.1})$$

$$-\Theta_z \ddot{\psi} + (F_{yv} \cdot \cos \delta_v + F_{xv} \cdot \sin \delta_v) \cdot l_v - (F_{yh} \cdot \cos \delta_h + F_{xh} \cdot \sin \delta_h) \cdot l_h = 0 \quad (\text{Gl. 4.2})$$

$$F_{yv} = c_v \cdot \left(-\beta + \delta_v - \frac{l_v \cdot \dot{\psi}}{v} \right) \quad (\text{Gl. 4.3})$$

$$F_{yh} = c_h \cdot \left(-\beta + \delta_h + \frac{l_h \cdot \dot{\psi}}{v} \right) \quad (\text{Gl. 4.4})$$

$$a_y = v (\dot{\psi} + \dot{\beta}) \quad (\text{Gl. 4.5})$$

Unter Annahme einer konstanten Fahrgeschwindigkeit ($\dot{v} = 0$) und unter Vernachlässigung von Termen höherer Ordnung werden aus der Kräfte- und Momentenbilanz nach der Transformation in den Laplacebereich die Gleichungen 4.6 und 4.7 gewonnen. Die in den Frequenzbereich transformierten Bewegungsgleichungen enthalten die noch unabhängigen Lenkwinkel der Vorder- und Hinterachse.

$$\left(c_h l_h - c_v l_v - m v^2 \right) \frac{\hat{\dot{\psi}}}{v} - \left(m v s + c_v + c_h \right) \hat{\beta} = -c_v \hat{\delta}_v - c_h \hat{\delta}_h \quad (\text{Gl. 4.6})$$

$$\left(c_h l_h - c_v l_v \right) \hat{\beta} + \left(-\Theta_z v s - c_v l_v^2 - c_h l_h^2 \right) \frac{\hat{\dot{\psi}}}{v} = c_h l_h \hat{\delta}_h - c_v l_v \hat{\delta}_v \quad (\text{Gl. 4.7})$$

Wird in den Bewegungsgleichungen 4.6 und 4.7 der hintere Lenkwinkel durch den vorderen Lenkwinkel (siehe Gleichung 4.8) beschrieben, ist die Ermittlung der Übertragungsfunktionen der Querbewegung (Gleichung 4.9) und der Gierrate (Gleichung 4.10) möglich. Die

⁶⁵ Nach der Taylorreihe (Abbruch nach dem ersten Glied) wird für den Kosinus 1 und für den Sinus das Argument des Winkels als Näherung verwendet.

Übertragungsfunktionen sind hier auf den Lenkwinkel des Vorderrads bezogen. Der Lenkwinkel des Hinterrads wird implizit durch die Übersetzung k zwischen Hinterachs- und Vorderachsenlenkwinkel ausgedrückt. Die in den Gleichungen verwendeten Abkürzungen der charakteristischen Geschwindigkeit v_{ch} (Gleichung 4.17), der ungedämpften Eigenkreisfrequenz des Fahrzeugs bei fixierter Lenkung ω_f und der Abklingkonstante des Fahrzeugs bei fixiertem Lenkrad σ_f sind im Anhang (Kapitel 10.2) angegeben.

$$\delta_h = k \delta_v \quad (\text{Gl. 4.8})$$

$$H_{ay}(s) = \frac{\hat{a}_y}{\hat{\delta}_v} = \frac{\frac{v^2}{l}(1-k) + \frac{v}{l}(l_h + k l_v)s + \frac{\Theta v^2}{l^2} \left(\frac{1}{c_h} + k \frac{1}{c_v} \right) s^2}{\left[1 + \left(\frac{v}{v_{ch}} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{2\sigma_f}{\omega_f^2} s + \frac{1}{\omega_f^2} s^2 \right)} \quad (\text{Gl. 4.9})$$

$$H_{\dot{\psi}}(s) = \frac{\hat{\dot{\psi}}}{\hat{\delta}_v} = \frac{\frac{v}{l}(1-k) + \frac{mv^2}{l^2} \left(\frac{l_v}{c_h} - k \frac{l_h}{c_v} \right) s}{\left[1 + \left(\frac{v}{v_{ch}} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{2\sigma_f}{\omega_f^2} s + \frac{1}{\omega_f^2} s^2 \right)} \quad (\text{Gl. 4.10})$$

Die Gierübertragungsfunktion (Gleichung 4.10) zeigt für einen gleichsinnigen Lenkeinschlag des Hinterrads ($k > 0$), dass sowohl die stationäre Gierrate ($s \rightarrow 0$) als auch die Gierrate im instationären Bewegungszustand im Vergleich zu einem Fahrzeug ohne Hinterachsenlenkung ($k = 0$) kleiner ist. Die Übertragungsfunktion der Querbeschleunigung (Gleichung 4.9) zeigt im stationären Zustand ebenfalls eine kleinere Querbeschleunigung. Im instationären Bewegungszustand beschreibt sie hingegen eine größere Querbeschleunigung, was in einem schnellen Anstieg der Querbeschleunigung deutlich wird. Beide Fahrzeugreaktionen sind erwartungskonform zu einem gleichsinnigen Lenkeinschlag der Hinterräder. Verantwortlich für den schnelleren Anstieg der Querbeschleunigung ist die Querkraft der Hinterachse. Diese kann bei aktiver Ansteuerung des Hinterachsenlenkwinkels früher aufgebaut werden. Bei Fahrzeugen ohne aktive Hinterachsenlenkung folgt der Aufbau der Hinterachsquerkraft der Trägheitskraft infolge der Fahrzeugbewegung.⁶⁶ Eine Beeinflussung der Querdynamik hinsichtlich der Verstärkung von Querbeschleunigung und Gierrate sowie deren Phasen ist nur durch den zusätzlichen Freiheitsgrad an der Hinterachse darstellbar.

4.2 Abschätzung der Phasendifferenz

Zur Abschätzung der zu erwartenden Fahrzeugantwort werden aus den Übertragungsfunktionen (Gleichungen 4.9 und 4.10) eines eingeschwungenen Fahrzustands ($s = j\omega$) die Phasengänge bestimmt.⁶⁷ Aus den beiden Übertragungsfunktionen ergeben sich dann die Phasengänge der Querbeschleunigung (Gleichung 4.11) und der Gierrate (Gleichung 4.12).

⁶⁶ Sano et al. (1979): The Effect of Improved Vehicle Dynamics on Drivers Control Performance, S. 885

⁶⁷ Unbehauen (2002): Regelungstechnik I, S. 83

$$\varphi_{ay}(\omega) = \arctan \left(\frac{\left[\frac{v}{l} (l_h + k l_v) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_f^2} \right) - \frac{2\sigma_f v^2}{\omega_f^2 l} (1-k) + \frac{2\sigma_f \Theta v^2 \omega^2}{\omega_f^2 l^2} \left(\frac{1}{c_h} + k \frac{1}{c_v} \right) \right] \omega}{\left(\frac{v^2}{l} (1-k) - \frac{\Theta v^2 \omega^2}{l^2} \left(\frac{1}{c_h} + k \frac{1}{c_v} \right) \right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_f^2} \right) - \frac{2\sigma_f v}{\omega_f^2 l} (l_h + k l_v) \omega^2} \right) \quad (\text{Gl. 4.11})$$

$$\varphi_{\psi}(\omega) = \arctan \left(\frac{\left[\frac{m v^2}{l^2} \left(\frac{l_v}{c_h} - k \frac{l_h}{c_v} \right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_f^2} \right) - \frac{v}{l} (1-k) \frac{2\sigma_f}{\omega_f^2} \right] \omega}{\frac{v}{l} (1-k) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_f^2} \right) - \frac{2\sigma_f m v^2}{\omega_f^2 l^2} \left(\frac{l_v}{c_h} - k \frac{l_h}{c_v} \right) \omega^2} \right) \quad (\text{Gl. 4.12})$$

Mit Blick auf die Aufgabenstellung, der gezielten Untersuchung der Phasenbeziehung im Feldversuch, können aus den Gleichungen der Phasengänge durch eine Variation der Lenkübersetzung k unterschiedliche Phasen der Querbeschleunigung und Gierrate generiert werden. Diese Eigenschaft wird hier genutzt, um bei konstanter Geschwindigkeit und konstanter Lenkfrequenz gezielt die Phasendifferenz zwischen Querbeschleunigung und Gierrate durch die Veränderung der Lenkübersetzung k zu variieren. Der Zusammenhang zwischen der sich einstellenden Phasendifferenz und der Lenkübersetzung k wird nach Gleichung 4.13 aus den Phasenbeziehungen der Querbeschleunigung und Gierrate bestimmt.

$$\Delta \varphi(\omega) = \varphi_{ay}(\omega) - \varphi_{\psi}(\omega) \quad (\text{Gl. 4.13})$$

Der durch die Veränderung der Hinterachslenkübersetzung darstellbare Bereich der Phasendifferenz ist in Abbildung 4.2 in Abhängigkeit der Hinterachslenkübersetzung k dargestellt.⁶⁸ Die Berechnung der Phasendifferenz beruht auf identifizierten Parametern des Versuchsfahrzeugs.⁶⁹ Die Berechnung zeigt die Variation der Phasendifferenz durch die Übersetzung der Hinterachslenkung in einem weiten Bereich. Die Übersetzung $k = 0$ beschreibt dabei die Phasendifferenz eines Standardfahrzeugs ohne Hinterachslenkung (inaktive Hinterachslenkung). Eine Vergrößerung der Übersetzung führt zu einer Verminderung der Phasendifferenz. Bei einem Übersetzungsverhältnis von 0,19 herrscht Phasengleichheit zwischen Querbeschleunigung und Gierrate. Eine über diese Übersetzung hinaus vergrößerte Übersetzung führt zu einer Umkehrung der Phasendifferenz, aufgrund der jetzt kleineren Phase der Querbeschleunigung gegenüber der Gierrate.⁷⁰ Ausgehend von diesen Berechnungen wird im Feldversuch eine gezielte Beeinflussung der Phasendifferenz durch die bloße Veränderung der Lenkübersetzung zwischen Hinter- und Vorderachse erwartet.

⁶⁸ Die Wahl der Lenkübersetzung k entspricht der späteren, in den Versuchen eingesetzten, Lenkübersetzungen.

⁶⁹ Vgl. Kapitel 10.1, S. 116

⁷⁰ Die Gierrate eilt der Querbeschleunigung bei Lenkübersetzungen $k > 0,19$ und den hier gewählten Parametern nach.

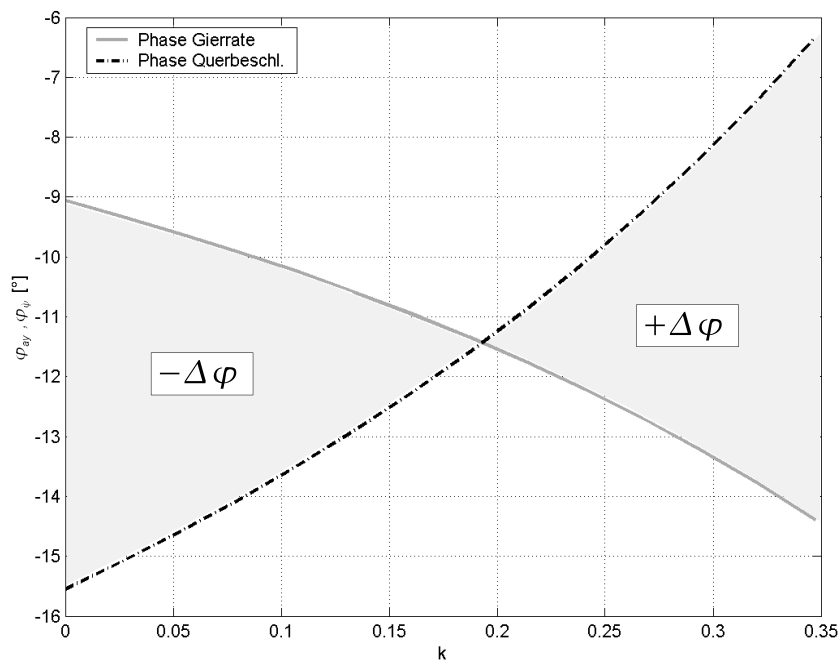


Abbildung 4.2: Phasendifferenz von Querbesehleunigung und Gierrate für unterschiedliche Hinterachslenkübersetzungen bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h und einer Lenkfrequenz von 0,36 Hz.

Das Übersetzungsverhältnis für die Phasengleichheit von Querbesehleunigung und Gierrate wird aus den Gleichungen 4.11, 4.12 und 4.13 für gegebene Fahrzeug- und Betriebsparameter ermittelt. Die Auflösung der Lenkübersetzung k liefert eine quadratische Gleichung mit den Koeffizienten a , b und c (Gleichung 4.14). Die Lösung mit negativem Vorzeichen der Wurzel bestimmt die Übersetzung zwischen Hinter- und Vorderachse, die einen identischen Phasengang von Querbesehleunigung und Gierrate für eine (Auslegungs-) Frequenz ω bewirkt. Die Lösung mit positivem Wurzel Ausdruck führt zu einem Übersetzungsverhältnis nahe eins und ist damit zur Variation der Phasendifferenz ungeeignet. Die sich aus der Übersetzungsgleichung ergebenden Koeffizienten sind im Anhang (Kap. 10.2) angegeben. Im Unterschied zu bisher veröffentlichten Lösungen weist die in Gleichung 4.14 dargestellte Übersetzung im Bereich größerer Geschwindigkeiten keine Unstetigkeit auf.^{71,72} Die formale Richtigkeit der Übersetzung zur Phasengleichheit von Querbesehleunigung und Gierrate ist durch Simulationsrechnungen nachgewiesen.

$$k = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad (\text{Gl. 4.14})$$

Mit der Lenkübersetzung aus Gleichung 4.14 wird eine gleiche Phase von Querbesehleunigung und Gierrate bezogen auf den Lenkwinkel der Vorderräder im Schwerpunkt des Fahrzeugs hervorgerufen. Mit der Phasendifferenz des Standardfahrzeugs ($k = 0$) besteht eine weitere ausgezeichnete Übersetzung zur Untersuchung des Einflusses der Phasen-

71 Takiguchi et al. (1986): Improvement of Vehicle Dynamics by Vehicle-Speed-Sensing Four-Wheel Steering System, S. 4

72 Redlich (1994): Objektive und subjektive Beurteilung aktiver Vierradlenkstrategien, S. 37

differenz auf die Bewertung der Fahrer. Wird dem Versuchsfahrzeug ein aktueller Stand der Technik unterstellt, stellt das Intervall der Lenkübersetzung zwischen den beiden ausgezeichneten Übersetzungen ein großer Anteil der bei aktuellen Fahrzeugen beobachtbaren Phasendifferenzen dar.⁷³ Eine Untersuchung in diesem Bereich stellt daher eine repräsentative Auswahl verfügbarer Fahrzeuge dar.

Für die in der Abbildung 4.2 rechnerisch ermittelten Phasendifferenzen wurden die Gleichungen 4.11 und 4.12 des Einspurmodells verwendet. Die in den Gleichungen verwendeten Parameter der Schwerpunktlage und Masse wurden direkt am Versuchsfahrzeug bestimmt. Die Trägheit um die Hochachse wird hingegen geschätzt. Der Beladungszustand des Fahrzeugs (das Fahrzeug ist mit Messtechnik ausgerüstet) wird direkt durch den Steinerschen Satz, die Massen von Fahrer und Beifahrer implizit durch die empirische Gleichung der Trägheit⁷⁴ berücksichtigt. Die Schräglaufsteifigkeiten der Vorder- und Hinterachse werden in stationären Kreisfahrten ermittelt. Durch die Anordnung der Messgeräte im Versuchsfahrzeug⁷⁵ können hier der Achsschräglaufwinkel und die Querschleunigung an der Stelle der Hinterachse direkt gemessen werden. Auf eine weitere fehlerbehaftete Umrechnung kann dadurch verzichtet werden. Mit der Masseverteilung des Fahrzeugs wird aus Gleichung 4.15 die Schräglaufsteifigkeit der Hinterachse bestimmt.

$$c_h = \frac{a_{y,HA} m_{HA}}{\alpha_h} \quad (\text{Gl. 4.15})$$

Aus der stationären Giervverstärkung (Gleichung 4.16) und der charakteristischen Geschwindigkeit v_{ch} (Gleichung 4.17) wird mit der Lage des Schwerpunkts, der Masse und der Fahrgeschwindigkeit die Schräglaufsteifigkeit mithilfe des Lenkwinkels der Vorderachse bestimmt (Gleichung 4.18).

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_v}^{(stat)} = \frac{v}{l} \frac{1}{1 + \frac{v^2}{v_{ch}^2}} \quad (\text{Gl. 4.16})$$

$$v_{ch}^2 = \frac{l^2 c_h c_v}{m(c_h l_h - c_v l_v)} \quad (\text{Gl. 4.17})$$

$$c_v = \frac{m v^2 l_h}{\frac{\delta_v}{\dot{\psi}} l v - l^2 + \frac{l_v m v^2}{c_h}} \quad (\text{Gl. 4.18})$$

73 Es wird angenommen, dass aktuelle Serienfahrzeuge mit nicht aktiver Hinterachse bei gleicher Geschwindigkeit den Gesetzmäßigkeiten des Einspurmodells gehorchen und eine Phasengleichheit von Querschleunigung und Gierrate nicht vorliegt.

74 Reimpell (1995): Fahrwerktechnik: Grundlagen, S. 370

75 Die Messgeräte zur Erfassung der Querschleunigung und der Geschwindigkeit sind über der Hinterachse bzw. hinter der Hinterachse angeordnet. Vgl. Kapitel 5.5.

Die ermittelten Schräglaufsteifigkeiten beschreiben jedoch nur den stationären Zustand. Die in instationären Fahrzuständen auftretende Dynamik der Vertikalkräfte hat, wie der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn, einen komplexen Einfluss auf die Schräglaufsteifigkeit und wird durch diese Identifikation nicht berücksichtigt. Die resultierende Simulationsgüte der ermittelten Parameter zeigt Abbildung 4.3 im Vergleich zu Validierungsmessungen, die bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h und einer konstanten Lenkfrequenz von 0,36 Hz bei unterschiedlichen Übersetzungen der Hinterachse k ermittelt wurden.

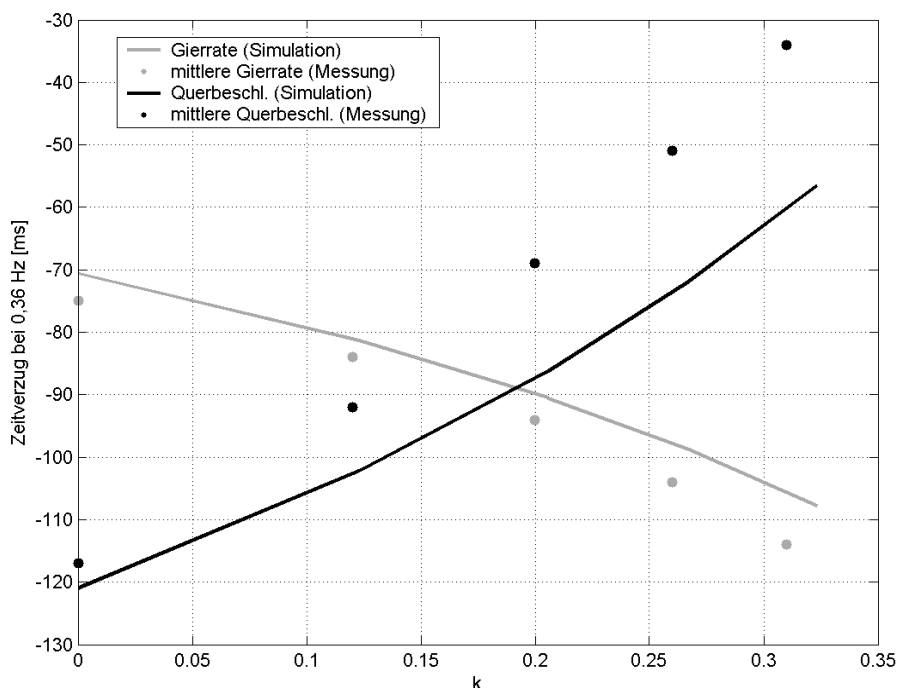


Abbildung 4.3: Zeitverzögerung der Querbewegung und Gierrate aus Messung und Simulation für eine konstante Anregung von 0,36 Hz und 80 km/h

In der Abbildung wird mit zunehmender Übersetzung der Hinterachse eine Abweichung zwischen der gemessenen mittleren Gierrate und der aus der Simulation bestimmten Gierrate identifiziert. Die gemessenen Zeitverzögerungen können mit dem Einspurmodell mit (übersetzungsabhängigen) Abweichungen von 5 ms bis 25 ms vorhergesagt werden. Die durch das lineare Einspurmodell ermittelte Querbewegung weist zu große Zeitverzögerungen gegenüber den Messungen auf, was auf die Abbildung des Fahrwerks und der Reifen im Einspurmodell zurückzuführen ist. Für geringere Zeitverzögerungen der Querbewegung wäre eine Vergrößerung der Schräglaufsteifigkeiten vorteilhaft, die jedoch (durch größere Achsquerkräfte) wieder zu größeren Zeitverzögerungen der Gierraten und damit zu einer insgesamt schlechteren Simulation führen würde. Das hier vorliegende Ergebnis stellt bezüglich der Simulation der Zeitverzögerungen zwischen Querbewegung und Gierrate die Grenze des linearen Einspurmodells dar. Bezüglich der Identifikationsmethode der Schräglaufsteifigkeit kann daher davon ausgegangen werden, dass durch eine andere Methode der Bestimmung der Schräglaufsteifigkeit keine signifikant besseren Simulationsergebnisse des Einspurmodells erreicht werden können.

4.2.1 Parameteranpassung

Zur experimentellen Untersuchung des Phasendifferenzwinkels wird mit Gleichung 4.13 ein Phasendifferenzwinkel aus Quereschleunigung und Gierrate vorgegeben. Die sich daraus ergebende Gleichung konnte zwar mathematisch nach der Lenkübersetzung aufgelöst werden, jedoch ist die Berechnung des Übersetzungsverhältnisses in Echtzeit im Versuchsfahrzeug mit der dort eingesetzten Hardware aufgrund der Komplexität nicht möglich. Daher wird im Experiment die Übersetzung bei Phasengleichheit mit einem konstanten Faktor multipliziert, der dann die zu untersuchende Phasendifferenz zwischen Quereschleunigung und Gierrate hervorruft. Das Nachführen von veränderlichen Parametern während der Versuche, wie z. B. der Geschwindigkeit oder der Schräglaufsteifigkeiten, führt nun jedoch zu Abweichungen gegenüber der ursprünglich erwarteten Phasendifferenz.

Tabelle 4.1 zeigt die mit dem Einspurmodell berechnete Änderung der Phasendifferenz, die hier zur besseren Vergleichbarkeit mit den Versuchen schon in einen Zeitverzug bei konstanter Lenkfrequenz von 0,36 Hz umgerechnet wird.

Zur Abschätzung des Einflusses der Änderung der Schräglaufsteifigkeiten werden 107 kN/rad für die Vorderachse und 145 kN/rad für die Hinterachse angenommen. Diese Achsschräglaufsteifigkeiten sind aus Kreisfahrten mit Reifen einer Profilhöhe von 4 mm ermittelt. Für neuwertige Reifen wird eine auf 80 % der Werte reduzierte Achsschräglaufsteifigkeit angenommen. Diese Schräglaufsteifigkeiten entsprechen dabei den Extremwerten der im Versuch aufgetretenen Achsschräglaufsteifigkeiten.

c_v [kN/rad]	c_h [kN/rad]	Zeitverzug [ms]				
		$k = 0$	$k = 0,12$	$k = 0,21$	$k = 0,27$	$k = 0,32$
86	116	-78	-47	-20	4	27
107	145	-50	-22	2	24	45
Differenz Zeitverzögerungen		28	25	18	20	18

Die berechneten Zeitverzögerungen in Tabelle 4.1 zeigen, dass bei nicht angelenkter Hinterachse (Variante $k = 0$) die Differenz der Zeitverzögerungen mit 28 ms durch die Änderung der Schräglaufsteifigkeiten am größten ist. Mit zunehmender Übersetzung verringert sich die Differenz der Zeitverzögerungen bis auf 18 ms infolge der Änderungen der Schräglaufsteifigkeiten. Die Abstände der Zeitverzögerungen untereinander werden mit zunehmender Lenkübersetzung k geringer. Für neuwertige Reifen ergeben sich aus Tabelle 4.1 Änderungen der Zeitverzögerungen zwischen zwei benachbarten Varianten von 31 ms, 27 ms, 24 ms und 23 ms bei neuwertigen Reifen und für Reifen mit einer Profiltiefe von 4 mm 28 ms, 24 ms, 22 ms und 21 ms.

Die Veränderung der Schräglaufsteifigkeiten hat einen Einfluss auf die absolute Größe des Zeitverzugs. Da die Empfindlichkeit der Fahrer auf den Zeitverzug unbekannt ist, kann die Änderung infolge der Änderung der Schräglaufsteifigkeiten hier nicht vernachlässigt werden.

Das Ergebnis zeigt, dass die Schräglaufsteifigkeiten zur Berechnung der Übersetzung k an die im Versuch vorliegenden Schräglaufsteifigkeiten des Fahrzeugs angepasst werden müssen, um Abweichungen der Zeitverzüge durch die veränderlichen Fahrzeugparameter im Experiment zu minimieren. Das Ergebnis bedeutet aber auch, dass eine Anpassung der Schräglaufsteifigkeit nur zwischen zwei Probanden vorgenommen werden darf, damit von den Probanden über eine Versuchsreihe gleiche Varianten der Zeitverzüge bewertet werden.

4.2.2 Konstante Gierverstärkung

Die Untersuchung des Einflusses der Phasendifferenz auf die Bewertungen der Fahrer verlangt, dass alle weiteren Größen während der Versuche konstant sind, um eine Rückführung der Versuchsergebnisse auf die Phasendifferenz sicher behaupten zu können. Neben der Kompensation der durch Profilverschleiß sich einstellenden Änderung der Schräglaufsteifigkeiten muss auch der sich ändernde Lenkradwinkel durch das Mitlenken der Hinterräder kompensiert werden, da die (stationäre) Gierverstärkung als eine wesentliche Größe zur Identifikation der Fahrzeugreaktion angesehen wird.⁷⁶

Der Einfluss der Hinterradlenkübersetzung auf die stationäre Gierverstärkung kann durch den Betrag der Gleichung 4.10 ermittelt werden. Die passive Hinterachse ($k = 0$) definiert das Fahrverhalten des Standardfahrzeugs. Hieraus folgt, dass die stationäre Gierverstärkung bei aktivem Lenken der Hinterachse der stationären Gierverstärkung des Standardfahrzeugs entsprechen muss. Wird Gleichung 4.10 auf den Lenkradwinkel bezogen, liefert der Vergleich der Gierverstärkungen des Standardfahrzeugs und des aktiv gelenkten Fahrzeugs eine notwendige vordere Lenkübersetzung, sodass die Anforderung an eine gleiche Gierverstärkung erfüllt ist. Dazu wird der Betrag der Gierverstärkung des Standardfahrzeugs mit Standardlenkübersetzung i_{s0} und der Betrag der Gierverstärkung des Fahrzeugs mit aktiver Hinterachslenkung gleichgesetzt und die notwendige Lenkübersetzung ermittelt. Die sich ergebende Bestimmungsgleichung ist in Gleichung 4.19 angegeben.

76 Bisimis et al. (1977): Lenkwinkel-Sprung und Übergangsverhalten von Kraftfahrzeugen, S. 585

$$i_s = i_{s0} \sqrt{\frac{(c^2 + d^2) \left[\frac{m^2 v^4 \omega^2}{l^4} \left(\frac{l_v}{c_h} - k \frac{l_h}{c_v} \right)^2 + \frac{v^2}{l^2} (1 - k)^2 \right] - 4 \frac{v}{l} (1 - k) \frac{\omega m v^2}{l^2} \left(\frac{l_v}{c_h} - k \frac{l_h}{c_v} \right) \cdot c \cdot d}{(c^2 + d^2) \left[\frac{m^2 v^4 \omega^2}{l^4} \frac{l_v}{c_h} + \frac{v^2}{l^2} \right] - 4 \frac{v}{l} \frac{\omega m v^2}{l^2} \frac{l_v}{c_h} \cdot c \cdot d}} \quad (\text{Gl. 4.19})$$

$$c = \left(1 + \frac{v^2}{v_{ch}^2} \right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_f^2} \right)$$

$$d = -\omega \frac{2\sigma_f}{\omega_f} \left(1 + \frac{v^2}{v_{ch}^2} \right)$$

Für die im Anhang angegebenen Parameter ist die notwendige vordere Lenkübersetzung ermittelt (Tabelle 4.2), mit der eine konstante Gierverstärkung für die unterschiedlichen Übersetzungen k der Hinterachse für eine konstante Lenkfrequenz von 0,36 Hz sichergestellt werden kann. Aufgrund softwaretechnischer Einschränkungen der vorderen Lenkanlage des Versuchsfahrzeugs ist die Wahl auf ganzzahlige Lenkübersetzungsverhältnisse beschränkt. Aufgrund der Aktordynamik mussten weitere Einschränkungen bei der Wahl der Übersetzung hingenommen werden, sodass die gewählte vordere Lenkübersetzung von der berechneten vorderen Lenkübersetzung abweicht. Die gewählte Anpassung der Lenkübersetzung ist in Tabelle 4.2 (Spalte i_s) dargestellt. Diese gewählte Lenkübersetzung orientiert sich an der Konstanz der *stationären* Gierverstärkung (vgl. Gleichung 2.1).

Variante	$i_{s, theo}$	i_s	k	$ H_{ay}(0,36 \cdot 2\pi) $ [m/(s ² rad)]	$ H_{\psi}(0,36 \cdot 2\pi) $ [1/s]
Variante 0	15,2	15,2	0,00	6,68	0,32
Variante 1	13,4	14,0	0,12	6,35	0,30
Variante 2	12,2	13,0	0,20	6,20	0,30
Variante 3	11,2	12,0	0,26	6,20	0,30
Variante 4	10,5	11,0	0,31	6,31	0,30

Für die gewählten Lenkübersetzungen i_s sind in den beiden letzten Spalten von Tabelle 4.2 die auf den Lenkradwinkel bezogenen Amplitudenverhältnisse der Querschleunigung und Gierrate für eine konstante Lenkradwinkelfrequenz von 0,36 Hz bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h angegeben. Die Einschränkung auf eine ganzzahlige Auswahl der Lenküber-

setzung zeigt bei den Amplitudenverhältnissen der Gierrate eine nicht ausreichende Anpassung der Varianten 1 bis 4 auf das Amplitudenverhältnis der Variante 0. Die Änderungen der Amplitudenverhältnisse zwischen der Varianten 1 bis 4 sind klein.

Aufgrund der geringen Änderungen der ermittelten Amplitudenverhältnisse der Varianten 1 bis 4 kann davon ausgegangen werden, dass nur der Übergang zwischen den Varianten 0 und 1 anhand der Änderung der Querschleunigung- oder Gierratenverstärkung von Probanden erkannt werden kann. Von einer Identifikation der Variante anhand des Amplitudenverhältnisses der Querschleunigung kann aufgrund der geringeren Bedeutung der Querschleunigung gegenüber der Gierrate⁷⁷ und der Beanspruchung durch die Fahraufgabe nicht ausgegangen werden.

4.2.3 Fazit Beeinflussung der Phasendifferenz

Der Vergleich zwischen der gemessenen Phase von Querschleunigung und Gierrate mit den simulierten Ergebnissen des Einspurmodells zeigt, dass das gewählte Modell für diese Versuche eine Abschätzung der zu erwartenden fahrdynamischen Auswirkungen liefert. Die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationsergebnisse zeigen, dass eine Kontrolle der Schräglaufsteifigkeit während des Versuchsbetriebs notwendig ist und aufgrund des vereinfachten Ansatzes der Phasendifferenz nicht innerhalb einer Versuchsreihe eines Probanden angepasst werden darf, um eine gleichbleibende Beeinflussung der Fahrdynamik durch die Lenkübersetzung zu gewährleisten. Um eine unabhängige Untersuchung der Phasendifferenz von der Gierratenverstärkung sicherzustellen, wird mit dem Simulationsmodell gezeigt, dass eine Berücksichtigung der frequenzabhängigen Anteile in den Amplitudenverhältnissen der Querschleunigung und Gierrate zum Lenkradwinkel nicht zwingend notwendig ist. Aufgrund der in der Beispielrechnung ermittelten Ergebnisse wird erwartet, dass die nicht identischen Amplitudenverhältnisse der Querschleunigung und Gierrate den Probanden keinen eindeutigen Hinweis auf die gewählte Hinterachslenkübersetzung gibt.

4.3 Abschätzung der Störung der Fahrzeugbewegung

Für die Abschätzung der Wirkhöhe einer Störung an dem Lenksystem der Vorder- oder Hinterachse wird jeweils ein Lenkwinkelsprung angenommen, während das andere Lenksystem sich weiterhin in der Ruhelage befindet. Die Sprungfunktion des Schräglaufwinkels stellt die größtmögliche Störung der Fahrzeugbewegung durch das Lenksystem dar, da der verursachende Schräglaufwinkel nicht schneller als durch eine Heaviside-Funktion⁷⁸ aufgebracht werden kann. Die Heaviside Funktion wird in Prüfvorschriften durch eine Rampenfunktion technisch realisiert.⁷⁹ Vergleichbare Verfahren für Lenksysteme der Hinterachse sind nicht standardisiert, sodass eine Störung durch das Lenksystem der Hinterachse anhand des Störwinkels oder anhand der durch die Störung resultierenden Änderung der Fahrzeug-

⁷⁷ Bisimis et al. (1977): Lenkwinkel-Sprung und Übergangsverhalten von Kraftfahrzeugen, S. 585

⁷⁸ auch Sprung- oder Treppenfunktion.

⁷⁹ z. B. Norm ISO 7401 (2003): Road vehicles lateral transient response test methods Open-loop test methods

bewegung klassifiziert werden muss. Welche Klassifikation herangezogen wird, hängt auch von der Betrachtungsweise ab. Eine systemnahe Betrachtung wird den Lenkwinkel als Quantifizierungsgröße heranziehen, während eine fahrerbezogene Betrachtung eher die Störung der den Fahrer direkt betreffenden Größen (Fahrzeugbewegung, Lenkradmoment, Lenkradwinkel) berücksichtigt. Die Quantifizierung anhand der Lenkwinkel ist zwar einfach zu identifizieren, erschwert aber die Vergleichbarkeit identischer Störungen zwischen Fahrzeugen unterschiedlicher Parameter (z. B. Radstand oder Schwerpunktlage). Eine Vergleichbarkeit der Störungsauswirkung ist durch Bewertung der Störung der Fahrzeugbewegung leichter zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen möglich.

Die aufgrund einer Störung des vorderen Lenkwinkels entstehende Störung der Fahrzeugbewegung wird durch die Übertragungsfunktionen (Gleichungen 4.9 und 4.10) für einen inaktiven Hinterradlenkwinkel ($k = 0$) ermittelt. Die sich im Störungsfall einstellende Querschleunigung wird durch Gleichung 4.20 beschrieben, die aus Gleichung 4.9 hervorgeht. Die Gierrate bestimmt sich in diesem Störungsfall gemäß Gleichung 4.21.

$$\frac{\hat{a}_y}{\hat{\delta}_v}(s) = \frac{\frac{v^2}{l} \left(1 + \frac{l_h}{v} s + \frac{\Theta}{c_h l} s^2 \right)}{\left[1 + \left(\frac{v}{v_{ch}} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{2\sigma_f}{\omega_f^2} s + \frac{1}{\omega_f^2} s^2 \right)} \quad \text{für } \hat{\delta}_h = 0 \quad (\text{Gl. 4.20})$$

$$\frac{\hat{\psi}}{\hat{\delta}_v}(s) = \frac{\frac{v}{l} \left(1 + \frac{m v l_v}{l c_h} s \right)}{\left[1 + \left(\frac{v}{v_{ch}} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{2\sigma_f}{\omega_f^2} s + \frac{1}{\omega_f^2} s^2 \right)} \quad \text{für } \hat{\delta}_h = 0 \quad (\text{Gl. 4.21})$$

Zur qualitativen Ermittlung der Auswirkungen einer Störung des hinteren Lenksystems müssen die Übertragungsfunktionen aus den Gleichungen 4.6 und 4.7 bestimmt werden. Die Gleichungen 4.22 und 4.23 zeigen die Übertragungsfunktion für die Querschleunigung und Gierrate für eine ausschließliche Anlenkung des Fahrzeugs über die Hinterachse. Für die Berechnung der Störungsauswirkung an der Hinterachse wird vorausgesetzt, dass zeitgleich kein Lenkwinkel an der Vorderachse aufgebracht wird ($\delta_v = 0$).

$$\frac{\hat{a}_y}{\hat{\delta}_h}(s) = \frac{-\frac{v^2}{l} \left(1 - \frac{l_v}{v} s - \frac{\Theta}{c_v l} s^2 \right)}{\left[1 + \frac{v^2}{v_{ch}^2} \right] \left(1 + \frac{2\sigma_f}{\omega_f^2} s + \frac{1}{\omega_f^2} s^2 \right)} \quad \text{für } \hat{\delta}_v = 0 \quad (\text{Gl. 4.22})$$

$$\frac{\hat{\psi}}{\hat{\delta}_h}(s) = \frac{-\frac{v}{l} \left(1 + \frac{mv l_h}{c_v l} s \right)}{\left[1 + \frac{v^2}{v_{ch}^2} \right] \left(1 + \frac{2\sigma_f}{\omega_f^2} s + \frac{1}{\omega_f^2} s^2 \right)} \quad \text{für } \hat{\delta}_v = 0 \quad (\text{Gl. 4.23})$$

Abbildung 4.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Querbeschleunigung und Gierrate eines zum Zeitpunkt 0 aufgetragenen Lenkwinkelsprungs an der Vorderachse (linkes Bild) oder Hinterachse (rechtes Bild) für eine Geschwindigkeit von 50 km/h. Die Amplituden der Störgrößen betragen in beiden beispielhaften Berechnungen 1,5° Lenkwinkel.

Abbildung 4.4 (links) zeigt einen Zeitverlauf der Querbeschleunigung, der zeitgleich mit der Störung an der Vorderachse stark ansteigt. Der Anstieg der Querbeschleunigung wird durch das Eindrehen des Vorderwagens und dadurch vermindertem Schräglaufwinkel der Vorderachse verringert. Mit fortschreitender Drehbewegung des Fahrzeugaufbaus wächst an den Hinterrädern die Seitenkraft, wodurch die Querbeschleunigung erneut ansteigt. Die Gierbewegung wächst während des gesamten Vorgangs an. Die Bewegungsgrößen sind von der Geschwindigkeit abhängig.

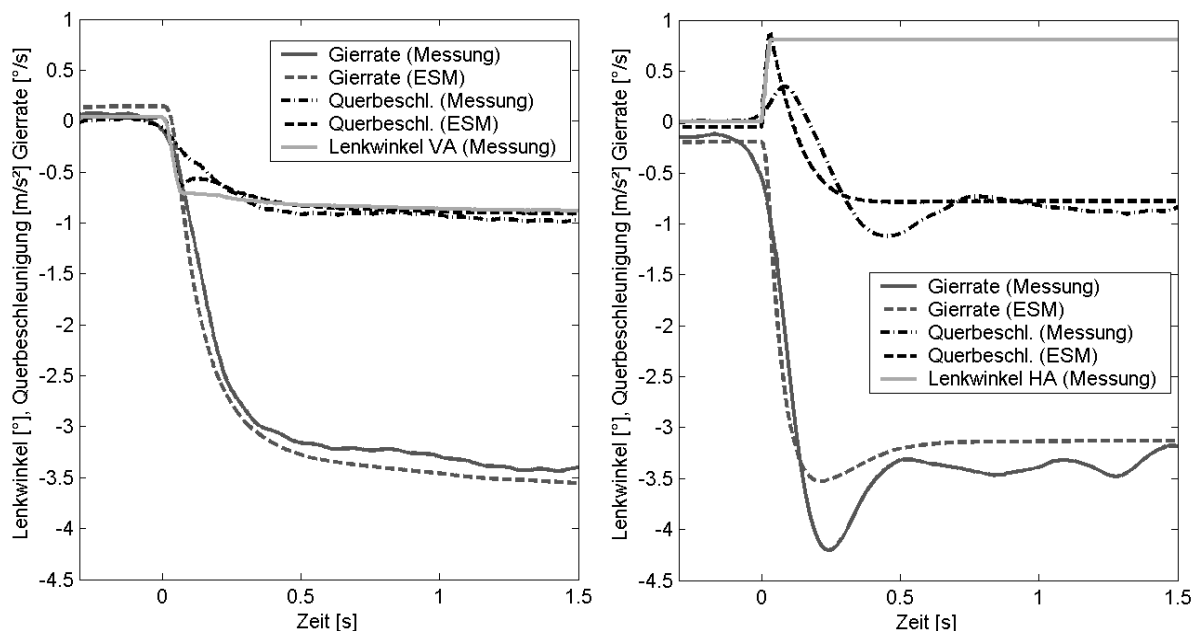


Abbildung 4.4: Vergleich einer gemessenen und berechneten Störung des vorderen (links) und des hinteren Lenkwinkels (rechts) bei fixiertem Lenkrad (Open-Loop fix-control) und 50 km/h. Modelleingangsgröße ist die Geschwindigkeit und der Lenkwinkelverlauf (jeweils Vorder- oder Hinterrad).

Eine in Betrag und Richtung identische Störung an der Hinterachse zeigt unter sonst gleichen Bedingungen das rechte Diagramm in Abbildung 4.4. Auch hier hat die Störung einen sofortigen Anstieg der Querbeschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt zur Folge, die jedoch im Betrag kleiner ist als eine Störung der Vorderachse. Die identische Störung an der Hinterachse führt hier zu einer entgegengesetzten Eindrehbewegung, sodass die sich ausbildenden Quer-

kräfte der Vorderachse nur für die Abstützung der Eindrehbewegung positiv sind. Die Querkkräfte der Vorder- und Hinterachse erreichen aufgrund der unterschiedlichen Abstände zum Schwerpunkt ein von der Störung der Vorderachse abweichendes stationäres Niveau. Auffallend in diesem Störungsfall ist der stärkere Anstieg und das Überschwingen der Gierrate. Grund dafür ist der weniger sprungförmig ausgeprägte Verlauf des vorderen Lenkwinkels, der dadurch auch einen abweichenden zeitlichen Verlauf der Bewegungsstörung verursacht.

Mit Hinblick auf die zu erwartenden Störungen zeigt Abbildung 4.5 den Grad einer Störauswirkung, jeweils für die maximale Querbeschleunigung (links) und maximale Gierrate (rechts) infolge eines Radstörwinkels an der Vorder- bzw. Hinterachse. Aus den in den Gleichungen 4.20 bis 4.23 dargestellten Zusammenhänge werden die zu erwartenden Extrema der Gierrate und Querbeschleunigung ermittelt.⁸⁰ Aufgrund der linearen Modelleigenschaft des Einspurmodells besteht ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Störauswirkung und dem verursachenden Störlenkwinkel. Zur leichteren Vergleichbarkeit der Bewegungsstörung wird der Betrag der auf den Störlenkwinkel bezogenen Störauswirkung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit in der Abbildung 4.5 dargestellt.

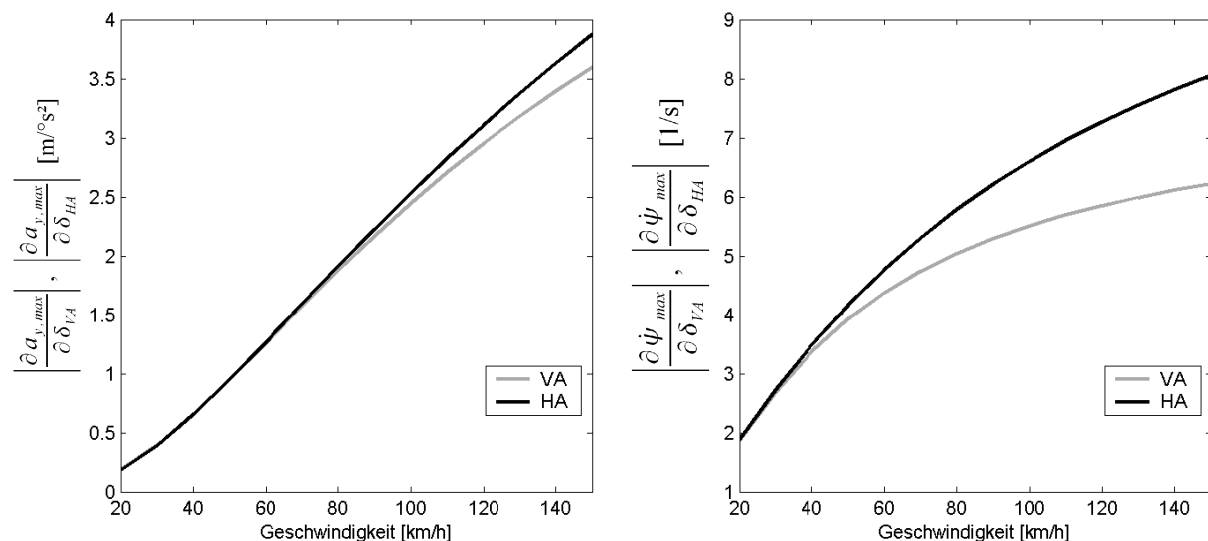


Abbildung 4.5: Betrag des Störungsgradient zur Abschätzung der maximalen Querbeschleunigung und maximalen Gierrate in Abhängigkeit der Geschwindigkeit bei fixiertem Lenkrad für Störaufschaltungen an der Vorderachse und beidseitige Störung der Hinterachse (auf Basis des Einspurmodells).

Die durch Störlenkwinkel an Vorder- oder Hinterachse entstehende maximale Querbeschleunigung zeigt nur eine geringe Unterscheidung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit (Abbildung 4.5 links). Bei Geschwindigkeiten oberhalb von rund 80 km/h werden Radstörwinkel an der Hinterachse in betragsmäßig größere Querbeschleunigungen umgesetzt als an der Vorderachse. Der Vergleich der berechneten Gradienten für die maximale Gierrate infolge

⁸⁰ Für die Darstellung der auf den Störlenkwinkel bezogenen Störung wird hier die unmittelbare Querbeschleunigungsspitze infolge des Radlenkwinkelsprungs nicht berücksichtigt, da im Versuch diese Spitze aufgrund der begrenzten Aktordynamik und Reifeneinlaufverhalten nur schlecht zu erfassen ist. Die Gierrate zeigt eine solche Spitze nicht (vgl. auch Abbildung 4.4).

eines Radstörwinkels zeigt bereits ab rund 40 km/h eine Unterscheidung (Abbildung 4.5 rechts). Radstörwinkel der Hinterachse werden ab dieser Geschwindigkeit in betragsmäßig größere Gierraten umgesetzt als vergleichbare Radstörwinkel der Vorderachse. Unter Vernachlässigung der Vereinfachungen des Einspurmodells zeigt die Abbildung, dass für das in dieser Arbeit eingesetzte Fahrzeug größere Störungen durch das hintere Lenksystem erwartet werden können. Die Abbildung zeigt aber auch, dass die Bewertung einer Störung anhand des objektiven Kennwertes der maximalen Querbeschleunigung nur ein geringes Potenzial zur Unterscheidung der beiden Störungen aufbringen wird.

Zur Abschätzung der Störungsauswirkung auf den Fahrer ist neben den Bewegungsgrößen das Lenkradmoment von Bedeutung. Wird von einer durch das Lenksystem verursachten Störung ausgegangen, so unterscheiden sich die Wirkpfade der beiden Störungen deutlich: Im Fall einer Störung an der Hinterachse wird eine Änderung des Lenkradmoments nur durch die Änderung der Querkräfte der Vorderachse hervorgerufen. Die Störkräfte des hinteren Lenksystems werden gegen den Aufbau abgestützt. Im Fall einer Störung an der Vorderachse muss neben der Änderung der Querkräfte der Vorderachse das Abstützmoment (Reaktions-Störmoment) am Lenkrad berücksichtigt werden. Das Abstützmoment wird zeitlich ohne Verzögerung dem Lenkradmoment aufgeprägt⁸¹, da der Fahrer erst durch die Abstützung des Störmomentes durch seinen Hand-Arm-Apparat einen Störwinkel der gelenkten Vorderräder ermöglicht. Erst durch den Störwinkel kann die Querbeschleunigung des Aufbaus infolge einer Störung des Lenkwinkels hervorgerufen werden.

Da der Fahrereinfluss unklar ist und für die Berechnung des Lenkradmoments Annahmen über die Nachlaufstrecke (Reifen und Lenkung), dem Verstärkungsgrad der Lenkunterstützung, über das Lenksystem zur Lenkwinkeladdition und der Motorleistung des Verstellantriebes getroffen werden müssen, ist eine belastbare Aussage zur Vergleichbarkeit des entstehenden Lenkradmoments infolge einer Störung hier nicht möglich.

4.3.1 Fazit zur Störung der Fahrdynamik

Die Störung der Fahrdynamik, ausgedrückt durch die Gierrate und Querbeschleunigung, infolge eines Lenkwinkelsprungs an der Vorder- oder Hinterachse kann zur Abschätzung der Störung der Fahrdynamik eingesetzt werden. Die messtechnische Ermittlung des Schwimmwinkels ist mit großem Fehler behaftet, sodass eine Aussage über die Qualität der Simulation kaum möglich ist. Auch ist die Abbildung des Lenkradmoments aufgrund der Annahmen über den inneren Aufbau des Lenksystems der Vorderachse und des Fehlens eines validen Modells nicht möglich.⁸² Die Simulation einer fahrerunabhängigen Störung hat aber dennoch ihre Berechtigung, da mit ihr eine größere Störung der Fahrzeugbewegung durch das hintere Lenk-

81 Ein Teil des Lenkstörmoments wird durch das Lenkradträgheitsmoment verzehrt, sodass der Fahrer nur die Differenz aus Lenkstörmoment und Lenkradträgheitsmoment multipliziert mit der Lenkradwinkelbeschleunigung abstützen muss.

82 Informationen über den inneren Aufbau des Lenksystems waren nicht zugänglich.

system bei betragsgleichem Störwinkel der Räder in Abhängigkeit der Fahrzeugparameter (z. B. Lage des Schwerpunkts) aufgezeigt wird.

4.4 Hypothesen

Aufgrund der bisher dargestellten Abschätzungen zum Zeitverzug und zur Störung der Fahrzeugbewegung durch einen Fehler im Lenksystem werden Hypothesen aufgestellt, deren Falsifikationen die Grundlage für die folgenden Arbeitsschritte sind.

Aufgrund der im Kapitel 2 dargelegten Aussagen und der in diesem Kapitel mithilfe des Einspurmodells gezeigten Zusammenhänge wird erwartet, dass eine Sensitivität der Fahrer bezüglich der Phasendifferenz zwischen Querschleunigung und Gierrate besteht. Es ist nachvollziehbar, dass große Phasendifferenzen (größer als die Phasendifferenz, die im gewohnten Erfahrungsbereich des Fahrers liegt) von Fahrern wahrgenommen werden können. Es ist auch leicht nachvollziehbar, dass kleinste Phasendifferenzen von Fahrern aufgrund von Fahrbahnanregung oder durch die Beanspruchung des Fahrers durch das Fahren selbst nicht mehr sicher wahrgenommen werden. Daher muss eine Phasendifferenz existieren, die die untere Grenze der von Fahrern wahrnehmbaren Phasendifferenz beschreibt. Mit der existenziellen Annahme, es existiere eine kleine (minimale) Phasendifferenz, unterhalb der der Fahrer nicht sensitiv auf die Phasendifferenz zwischen Querschleunigung und Gierrate ist, wäre der Grad des notwendigen technischen Aufwands zur Entwicklung einer Hinterachslenkung bekannt.⁸³ Die falsifizierbare universelle Hypothese zur Sensitivität der Phasendifferenz im Fahrversuch lautet daher:

Fahrer sind nicht sensitiv bezüglich der Phasendifferenz zwischen der Gierrate und der Querschleunigung, die in einem technisch sinnvollen Bereich variiert wird.

Die Falsifizierbarkeit der Hypothese ist aus technischer Sicht gegeben, da die Differenz der Phase aus Querschleunigung und Gierrate⁸⁴ im Fahrversuch im Rahmen der Open-Loop Störungen⁸⁵ einstellbar sind. Als Falsifikationsversuch ist ein monofrequenter Makrosinusversuch bei konstanter Geschwindigkeit und einer Variation der Lenkübersetzung im einseitigen Blindversuch geeignet.

Neben einer Sensitivität bezüglich der Phasendifferenz im Fahrversuch wird ein Zusammenhang zwischen der Phasendifferenz von Querschleunigung und Gierrate und der von den Fahrern bewerteten Beanspruchung während der Versuchsdurchführung behauptet. Diese Erwartung drückt die universelle Hypothese zur Beanspruchung der Fahrer durch eine Phasendifferenz aus:

83 Damit Zeitverzüge sicher eingestellt werden können, müssen Fahrzeugparameter wie Schräglaufsteifigkeit, Masse, Lage des Schwerpunktes (vgl. Kapitel 5.5) bekannt sein. Diese Parameter unterliegen bei normaler Nutzung Schwankungen, die nur durch weiteren technischen Aufwand erfasst werden können.

84 Bei konstanter Frequenz (Lenkfrequenz) beschreibt eine Phasendifferenz einen Zeitverzug zwischen Ausgang und Eingang eines Systems.

85 Open-Loop Störungen grenzen sich gegenüber Störungen im Fahrversuch durch das Fehlen der Fahrerreaktion ab. Open-Loop Störungen sind auf das Fahrzeug, Fahrbahn und Umwelt zurückzuführen.

Eine Verringerung des Betrags der Phasendifferenz zwischen der Querbesehleunigung und der Gierrate führt zu keiner Verringerung der Beanspruchung des Fahrers.

Die Falsifikation der Hypothese wird hier an der Beanspruchung der Fahrer im Fahrversuch festgemacht, da die Beanspruchung sich nicht an Fahrzeugeigenschaften orientiert. Darüber hinaus kann die Beanspruchung von jedem Fahrer, wenn auch interindividuell verschieden, sicher bewertet werden.⁸⁶ Auch hier ist die Hypothese falsifizierbar, da die Phasendifferenz definiert einstellbar ist (z. B. in Makrosinusversuchen) und die Beanspruchung von Fahrern selbst bewertet werden kann. Als Falsifikationsversuch ist wiederum der monofrequente Makrosinusversuch bei konstanter Geschwindigkeit und einer Variation der Lenkübersetzung im einseitigen Blindversuch geeignet.

Eine Störung der Fahrzeugbewegung durch einen Fehler in der Hinterachslenkung kann nicht ausgeschlossen werden. Störungen des vorderen Lenksystems wurden bereits mehrfach wissenschaftlich untersucht. Unklar ist bisher, welchen Einfluss der Wirkpfad einer Störung durch das vordere Lenksystem im Vergleich zur Störung des hinteren Lenksystems auf die Bewertungen der Fahrer hat. Da für Störungen durch das vordere Lenksystem bereits Ergebnisse und Methoden existieren, wird hier nur der Fall einer stärkeren Störung des hinteren Lenksystems gegenüber dem vorderen Lenksystem untersucht. Mit der Formulierung der Hypothese werden die Fälle einer gleichen bzw. schwächeren Bewertung einer Bewegungsstörung durch das hintere Lenksystem nicht weiter verfolgt. Die Hypothese zur Störungsbewertung betragsgleicher irreversibler Störungen an der Vorderachse und Hinterachse lautet daher:

Betragsgleiche irreversible Störungen⁸⁷ des hinteren Lenksystems (beide Aktoren gleicher Störlenk Winkel) werden in Geradeausfahrt vom Fahrer kritischer bewertet als eine Störung des vorderen Lenksystems.

Diese Hypothese berücksichtigt die Geradeausfahrt als Fahrsituation, da sich die Störungsuntersuchung in der Geradeausfahrt als eine sensitive Bewertungssituation bewährt hat.^{88,89} Bei der Hypothese wird von einer konstanten Fahrgeschwindigkeit ausgegangen. Auch diese Hypothese ist falsifizierbar, da eine Störung sowohl an der Vorderachse als auch an der Hinterachse provoziert werden kann und eine kritischere Bewertung einer Störung der Vorderachse durch die Fahrer bewertet werden könnte.

Neben der phänomenologischen Betrachtung einer Störung der Hinterachse ist die Auswirkung einer Störung auch abhängig vom Konstruktionsprinzip der Hinterachslenkung. Wird eine radindividuelle Aktorik eingesetzt, besteht die Möglichkeit einer einseitigen Störung. In einer Geradeausfahrt wird davon ausgegangen, dass eine Störung der Fahrzeugbewegung un-

⁸⁶ Neukum et al. (2001): Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften

⁸⁷ Betragsgleiche Störungen werden an der Änderung der Fahrzeugbewegung ermittelt. Der Radstörwinkel ist ungeeignet, da die Auswirkung von der Achslast (Radlast), Schräglaufsteifigkeit und Entfernung vom Schwerpunkt abhängen.

⁸⁸ Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien

⁸⁹ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures

abhängig von der Art der Störung ist. Die Hypothese zur Störungsbewertung einer rad-individuellen Störung in Geradeausfahrt wird daher wie folgt beschrieben:

Betragsgleiche Störungen der Fahrzeugbewegung durch beide Hinterräder (symmetrische Störung – beide Aktoren gleicher Störwinkel) oder ein Hinterrad (asymmetrische Störung eines Aktors - doppelter Störwinkel in Radnachspur) werden in Geradeausfahrt vom Fahrer kritischer bewertet, wenn die Störung von einem Hinterrad verursacht wird.

Mit der Formulierung der Hypothese wird beschrieben, dass eine gleichgroße Störung von zwei Aktoren oder einem Aktor mit doppeltem Störwinkel verursacht werden kann. In der auf die Störung folgenden Kompensationsreaktion des Fahrers kann in Abhängigkeit des vorliegenden Störwinkels am Hinterrad eine unterschiedliche Fahrzeugreaktion infolge der unterschiedlichen Vertikalkräfte und der noch anliegenden Störwinkel der Räder hervorgerufen werden. Auch diese Hypothese ist falsifizierbar, da die Fahrer die Möglichkeit haben, die Schwere der Störung unabhängig von der Art der Störung gleich zu bewerten.

Das Vorliegen eines stationären Vertikalkraftunterschieds wird mit der Unterschiedshypothese über den Vergleich der symmetrischen Stellfehler in Gerade- und Kurvenfahrt erfasst. Die Formulierung der Hypothese berücksichtigt, dass aufgrund des Vorliegens einer stationären Querkraft ein identischer Störwinkel aufgrund einer unterschiedlichen Fahrzeugreaktion unterschiedliche Bewertungen der Fahrer hervorrufen kann. Die Hypothese zur Untersuchung lautet:

Symmetrische Störungen der Hinterachse werden in Kurvenfahrten vom Fahrer kritischer bewertet als identische Störungen in Geradeausfahrt.

Auch diese Hypothese ist falsifizierbar, da die Fahrer die Möglichkeit haben, Störungen durch die Hinterachse in Geradeausfahrt und Kurvenfahrt gleich zu bewerten.

Bei Wahl eines Ein-Aktorkonzeptes ergibt sich analog der vorangegangenen Hypothese eine identische Hypothese für den Einfluss eines stationären Vertikalkraftunterschieds auf die Störungsbewertung im Fall einer einseitigen Störanregung der Hinterachse:

Einseitige Störungen durch das kurvenäußere Rad der Hinterachse werden in Kurvenfahrten vom Fahrer kritischer bewertet als identische Störungen in Geradeausfahrt.

Wie auch die anderen Hypothesen ist diese ebenfalls falsifizierbar, da die Fahrer einen anderen als von der Hypothese postulierten Zusammenhang bewerten können.

Die in diesem Abschnitt angegebenen Hypothesen bilden die Grundlage des weiteren Vorgehens zur experimentellen Untersuchung der Phasendifferenz und der Störung im Probandenversuch. Die hier aufgestellten Hypothesen beziehen sich auf Sachverhalte, die empirisch untersucht werden können und die falsifizierbar sind. Eine Falsifizierbarkeit setzt voraus, dass in einem Experiment Ergebnisse existieren könnten, die den behaupteten Zusammenhängen widersprechen.⁹⁰

90 Popper, Keuth (2005): Logik der Forschung, S. 62

Ein Beleg für die Bewährung oder Ablehnung einer Hypothese erfolgt hier mithilfe statistischer Verfahren. Die Hypothesenüberprüfung durch statistische Verfahren hat den Vorteil, dass die in den Untersuchungen ermittelten Ergebnisse durch bereits bewährte Methoden in quantitative Kennzahlen überführt und untereinander interpretiert werden können. Eine Hypothesenüberprüfung mit statistischen Verfahren ist jedoch nicht fehlerfrei, sondern beinhaltet immer eine Wahrscheinlichkeit, dass die nach dem Test akzeptierte Hypothese nicht mit der (meist unbekannten) Grundgesamtheit übereinstimmt. Neben den beiden Fällen, dass die akzeptierte Hypothese der Grundgesamtheit entspricht, können Fehler der ersten Art (α -Fehler) oder zweiter Art (β -Fehler) vorliegen. Fehler der ersten Art geben die Wahrscheinlichkeit an, dass aufgrund des Testergebnisses die Alternativhypothese akzeptiert wird, obwohl die Nullhypothese in der Grundgesamtheit gültig ist. Ein Fehler der zweiten Art (β -Fehler) gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass eine Nullhypothese beibehalten wird, obwohl die Alternativhypothese in der Grundgesamtheit Gültigkeit besitzt.

Für die Aussagen statistischer Tests bedeutet dies, dass eine durch einen Test nicht zurückgewiesene Nullhypothese nicht automatisch den Sachverhalt der Grundgesamtheit repräsentiert, sondern immer noch dem Fehler zweiter Art unterliegt. Um eine statistisch abgesicherte Aussage aus den durchzuführenden Versuchen treffen zu können, müsste der Fehler bestimmt werden, mit dem die akzeptierte Hypothese dennoch falsch ist. Eine Angabe des β -Fehlers setzt allerdings voraus, dass die zu testende Hypothese spezifisch und gerichtet ist. Eine Unterschiedshypothese muss damit eine quantitative Aussage enthalten, um wie viel sich Alternativhypothese und Nullhypothese unterscheiden. Um die Differenz der zu testenden Verteilungen bereits bei der Hypothesenformulierung angeben zu können, müssten wiederum die Verteilungen der beiden Merkmale bekannt sein. Dies setzt voraus, dass vor dieser Untersuchung belastbare Untersuchungen zu dem gleichen Untersuchungsgegenstand stattgefunden haben. Da diese nicht identifiziert werden konnten, kann ein Fehler zweiter Art nicht angegeben werden und die Formulierung der Hypothesen muss daher unspezifisch erfolgen.

5 Methodik und Untersuchungswerkzeuge

5.1 Versuchsaufbau zur Systemauslegung

Die empirische Untersuchung der Systemauslegung mit Hilfe von Normalfahrern setzt voraus, dass eine definierte Phasendifferenz zwischen Querb beschleunigung und Gierrate im Feldversuch sicher hergestellt werden kann. Eine Phasendifferenz kann nur in instationären (oder periodischen) Fahrmanövern aufgebracht werden, da nur hier ein Aufbau der Querb beschleunigung und der Gierrate erfolgt. In stationären Manövern haben die Querb beschleunigung und Gierrate ihren Endwert erreicht und sind zeitlich unveränderlich, sodass eine Bewertung der Phasendifferenz durch die Fahrer im Fahrversuch nicht möglich ist. Instationäre Fahrzustände werden durch Auf- oder Abbau von Querb beschleunigung und Gierrate bei konstanter Fahrgeschwindigkeit generiert, um die Durchführung der Fahrmanöver einfach und reproduzierbar gestalten zu können. Für den Fahrversuch können bei konstanter Fahrgeschwindigkeit sechs Grundmanöver durch Kombination von Kurven mit unterschiedlichen Krümmungen⁹¹ unterschieden werden, wobei eine Gerade als Kurve mit Krümmung 0 beschrieben wird (Tabelle 5.1).

Zustandsänderung	Eingangs- krümmung	Ausgangs- krümmung	Bemerkung
1	0	0	Gerade
2	0	κ_1	Kurveneingang
3	κ_1	0	Kurvenausgang
4	κ_1	κ_2 mit $\kappa_2 < \kappa_1$	Kurvenübergang oder Wechselkurve
5	κ_1	κ_2 mit $\kappa_2 > \kappa_1$	
6	κ_1	κ_2 mit $\kappa_2 = \kappa_1$	konstanter Bogen

Die Zustandsänderungen 1 und 6 sind zur Untersuchung der Phasendifferenz im Fahrversuch aufgrund des unveränderten Fahrzustands nicht geeignet. Aus den verbleibenden Zustandsänderungen 2 und 3 sowie 4 und 5 können die Grundmanöver Spurwechsel und Wechsel lenken abgeleitet werden. Durch eine gezielte Kombination der in der Tabelle 5.1 dargestellten Zustandsänderungen können für konstante Geschwindigkeit literaturbekannte Manöver dargestellt werden.⁹² Aufgrund der Verträglichkeit der hier dargestellten

91 Die Krümmung einer Kurve ist definiert als Kehrwert des Kurvenradius.

92 Rönitz et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen - Teil 1

instationären Grundmanöver mit bereits bewährten und anerkannten Untersuchungsmethoden werden keine anderen Manöver zur Untersuchung der Phasendifferenz erwartet, die einen ähnlich geringen Aufwand zur Durchführung haben und eine bessere Eignung zur Untersuchung der Phasendifferenz im Feldversuch ermöglichen.

Aus den Zustandsübergängen 4 und 5 wird durch mehrfache Wiederholung ein Wechsellenken (Makrosinusversuch) erstellt, das eine mehrfache Wahrnehmung der Phasendifferenz zulässt. Das Manöver wird bei konstanter Fahrgeschwindigkeit mit einer konstanten Lenkfrequenz ausgeführt, um eine konstante Beanspruchung des Fahrers bei der Ausführung des Manövers zu erreichen.⁹³

Durch eine gleichmäßige Beanspruchung des Fahrers durch das Manöver wird bei der späteren Durchführung der Versuche, im Gegensatz zur ansteigenden Beanspruchung, eine geringere Fehlerquote erwartet. Die zum Durchfahren des Manövers benötigte Lenkfrequenz sollte 0,4 Hz nicht überschreiten, da vom Fahrer Lenkbewegungen nur bis 0,4 Hz^{94,95} phasenrichtig ausgeführt werden können.⁹⁶ Für die versuchstechnische Umsetzung des Makrosinusversuchs wird aus diesem Grund eine geringere Lenkfrequenz zum Befahren des Parcours gefordert, da hierdurch angenommen werden kann, dass neben der Versuchsdurchführung die veränderte Fahrzeugreaktion durch die Fahrer noch differenziert wahrgenommen werden kann. Dazu muss die Querschleunigung und Gierrate während der Versuchsdurchführung deutlich größer als die menschliche Wahrnehmungsschwelle sein, da die gewünschte Fahrzeugreaktion zusätzlich von Störanregungen der Fahrbahn überlagert wird. Für die Querschleunigung liegt die Wahrnehmungsschwelle bei $0,18 \text{ m/s}^2$ und für die Gierbeschleunigung bei $4 \text{ }^\circ/\text{s}^2$.^{97,98} Die Gierrate des Fahrzeugs muss zur sicheren Wahrnehmung durch den Fahrer mehr als $0,9 \text{ }^\circ/\text{s}$ betragen.⁹⁹

Für die Untersuchung der Phasendifferenz zwischen der Querschleunigung und der Gierrate im Feldversuch wird hier davon ausgegangen, dass die Phasendifferenz für Fahrer keine geläufige Bewertungsgröße ist. Eine Bewertung anhand einer absoluten Skala, die eine Berücksichtigung vorangegangener Fahrversuche erfordert, wird hier als zu schwierig für die Probanden angesehen. Einer parallelen Verwendung einer sekundären Skala wird wegen der Verankerung des Nullpunkts und des Skalenmaximums nur ein geringer Erklärungsbeitrag beigemessen. Aus diesem Grund werden hier den Fahrern zwei unterschiedlicher Fahrzeugreaktionen (zwei Phasendifferenzen) zur Bewertung angeboten. Die Bewertung erfolgt dann durch eine vergleichende Bewertung von zwei Systemauslegungsvarianten. Einer Wahr-

93 Neukum et al. (2001): Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften

94 Weir et al. (1978): Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data, maximale kontrollierbare Lenkfrequenz 0,6 Hz

95 Whitehead (1988): Four Wheel Steering: Maneuverability and High Speed Stabilization, S.2, maximale kontrollierbare Lenkfrequenz 0,5 Hz

96 Heißing, Ersoy (2007): Fahrwerkhandbuch, S.141

97 Thomaske et al. (2005): Ein neuartiges Bewegungssystem für On- und Offroad Fahrsimulationen, S. 151

98 Kudritzki (1989): Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens, S.9 Wahrnehmungsgrenze der Gierbeschleunigung $0,05\text{-}0,2 \text{ }^\circ/\text{s}^2$

99 Muragushi et al. (2007): Development of Human Sensitivity Evaluation System for Vehicle Dynamics

nehmungseintrübung des ersten Versuchsteils gegenüber dem zweiten Versuchsteil wird durch einen kurzen zeitlichen Abstand zwischen den Versuchen entgegengewirkt. Diese Art des Versuchsdesigns (Paarvergleich) hat sich bereits in anderen Untersuchungen bewährt.¹⁰⁰

Für eine hohe Akzeptanz des Versuchsdesigns bei den Fahrern wird eine Geschwindigkeit von 80 km/h gewählt, da die erwartete Querbesehleunigung von bis zu 4 m/s^2 noch im Erfahrungsbereich von Nicht-Profifahrern (normal geübten Fahrern) liegt.¹⁰¹ Auch erscheint die gewählte Geschwindigkeit optimal, da die stationäre Gierverstärkung für die Standardlenkung (kein aktives Lenken der Hinterräder) eine hohe Umsetzung der Lenkbewegung ermöglicht. Aus der gewählten Fahrgeschwindigkeit und einem Pylonenabstand (Verkehrsleitkegel) von 30 m ¹⁰² ergibt sich eine Lenkfrequenz von $0,36 \text{ Hz}$ für den Makrosinusversuch. Der gesamte Parcours zur Untersuchung der Phasendifferenz ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Zur kontrollierten Ein- und Ausfahrt besitzen die Manöver jeweils 15 m lange Gassen. Die Pylonen des Wechsellenkungsabschnitts sind um die Mittellinie seitlich versetzt, um die maximale Querbesehleunigung zu reduzieren. In der Geradeausfahrt zwischen der Ausfahrgasse des ersten Manövers und der Einfahrgasse des zweiten Manövers werden die Lenksysteme des Fahrzeugs manipuliert, sodass in einem Parcours zwei unterschiedliche Systemauslegungen vergleichend in direkter Abfolge bewertet werden können. Die Bewertung findet direkt nach der Durchfahrt des Parcours im Fahrzeug statt. Für die Fahrer ist das objektive Leistungsmaß das fehlerfreie Befahren des gesamten Parcours. Fehlerfrei bedeutet hier, dass keine Pylone durch das Fahrzeug aus ihrer Position versetzt wird.

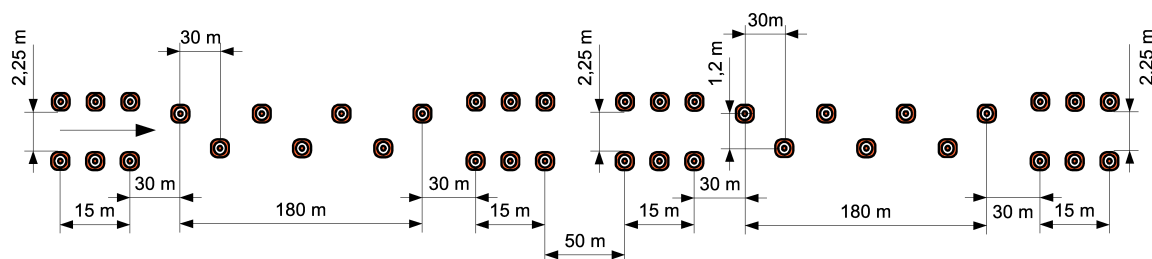


Abbildung 5.1: Abmessungen des Makrosinusversuchs. Erstes Manöver links, zweites Manöver rechts.

Aus den Zustandsänderungen 2 und 3 (siehe Tabelle 5.1) wird ebenfalls ein einfacher Spurwechsel hergeleitet. Ziel des Spurwechselmanövers ist, anhand der ausgehenden Geradeausfahrt die Kontrollierbarkeit einer Systemauslegung durch die Fahrer bewertbar zu machen. Dabei soll mit identischen Systemauslegungen des Makrosinusversuchs die Bewertung im Spurwechsel durchgeführt werden können. Die äußeren Abmessungen der Manöver wurden dabei so ausgelegt, dass ein identischer Phasenverzug wie im Makrosinusversuch entsteht. Auch hier werden immer zwei Systemauslegungen relativ zueinander von den Fahrern be-

100 Barthenheier et al. (2003): Das persönliche Lenkgefühl, S.7

101 Hackenberg et al. (1982): Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr

102 Der gewählte Pylonenabstand berücksichtigt Empfehlungen zum Slalomtest (vgl. Zomotor (1991):

Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, S.284) und erleichterte eine nachträgliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch ähnlichen Versuchsaufbau (vgl. Stamer (1997): Ermittlung optimaler Pkw-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung, S. 17)

wertet. Abbildung 5.2 zeigt den Versuchsaufbau des einfachen Spurwechsel-Parcours. Die Durchfahrtsgeschwindigkeit beträgt auch hier 80 km/h. Der Abstand zwischen der Ein- und Ausfahrgasse ist von dem Pylonenabstand des Makrosinusversuchs übernommen. Der seitliche Versatz des Fahrzeugs liegt mit Berücksichtigung der Fahrzeugbreite von 1,8 m minimal bei 3,05 m und maximal bei 3,95 m. Der minimale Versatz des Fahrzeugs ist im Spurwechselparcours größer als der im Makrosinusversuch zu leistende seitliche Versatz.

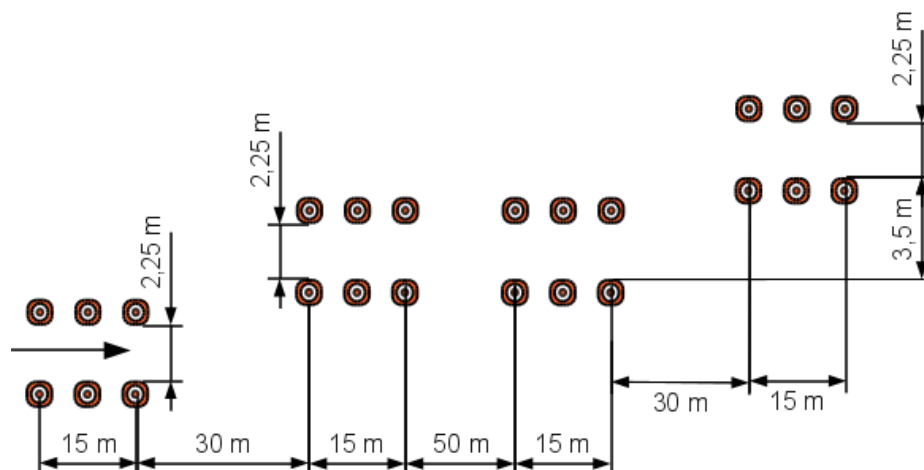


Abbildung 5.2: Abmessungen des Spurwechselversuchs. Erstes Manöver links, zweites Manöver rechts.

Eine vergleichende Frequenz des Lenkradwinkels kann nur sehr ungenau angegeben werden, da jeder Fahrer ein individuelles Lenkmuster zur Durchführung des Spurwechselmanövers besitzt.¹⁰³ Die Zeitsignale der Lenkradwinkel zeigen in der a posteriori Analyse, dass für diese Versuche eine Grundfrequenz von 0,4 Hz bis 0,5 Hz angenommen werden kann. Auch in diesen Versuchen wird nach dem ersten Spurwechsel während der Geradeausfahrt die Systemauslegung des Fahrzeugs verändert. Die Bewertung findet ebenfalls direkt nach der Parcoursdurchfahrt statt. Damit die notwendige Veränderung der vorderen Lenkübersetzung bei dem Wechsel der Systemauslegung vom Fahrer unbemerkt bleibt, ist die Einfahrgasse des zweiten Manövers in Verlängerung der Ausfahrgasse des ersten Manövers angeordnet. Der Wechsel der Systemeinstellung findet während der Geradeausfahrt statt und ist somit für den Fahrer fahrdynamisch nicht wahrnehmbar. Wie auch in den Makrosinusversuchen ist auch hier das objektive Leistungsmaß für den Fahrer mit dem fehlerfreien Befahren des Parcours verknüpft. Zur Vergleichbarkeit späterer Ergebnisse wird eine identische Durchfahrtsgeschwindigkeit von 80 km/h gewählt.

5.1.1 Versuchsplanung zur Systemauslegung

Für die fünf in den Versuchen zu analysierenden Systemauslegungen ergeben sich, ohne Berücksichtigung der Reihenfolge, zehn unterschiedliche Paarvergleiche. In Tabelle 5.2 sind für

¹⁰³ Jürgensohn et al. (1997): Die „Handschrift“ des Lenkens

den Makrosinus- und Spurwechselversuch die Zeitverzögerungen angegeben, die experimentell aus der Phasendifferenz zwischen Querschleunigung und Gierrate ermittelt werden.¹⁰⁴

Variante	k	i_s	$\tau_{\text{Makrosinus}} [\text{ms}]$	$\tau_{\text{Spurwechsel}} [\text{ms}]$
0	0	15,2	-42	-44
1	0,12	14,0	-7	-8
2	0,20	13,0	26	23
3	0,27	12,0	53	54
4	0,32	11,0	80	81

Bei der Versuchsplanung wird berücksichtigt, dass die ersten Versuche einen Einfluss auf die Bewertung der Fahrer haben können (Bereichseffekt). Es besteht hier die Möglichkeit, dass Fahrer die äußeren Teile der Bewertungsskala (Extrema) für die folgenden Manöver reservieren, um eventuell stärkere Merkmalsausprägungen angeben zu können. Wurden die extremen Manöver bereits bewertet, wird nur ein Teil der Skala zur Bewertung genutzt. Aus diesem Grund wird in den ersten beiden Versuchen jeweils der größte oder zweitgrößte und der kleinste bzw. zweitkleinste Zeitverzug zur Bewertung dargestellt. Den Fahrern ist es so möglich, ihre eigene Bewertung auf die Bewertungsskala frühzeitig anzupassen. Die Reihenfolge der verbleibenden übrigen acht Versuche wird über die Fahrer permutiert, sodass eventuell vorhandene Reihenfolgeeffekte über die Versuchsteilnehmer in der Auswertung nur eine geringe Auswirkung haben können. Zusätzlich wird je Fahrer und Parcours ein Paarvergleich als Retest wiederholt, um nachträglich die Reliabilität der Bewertungen abschätzen zu können. Insgesamt sind von jedem Versuchsteilnehmer jeweils elf Paarvergleiche der Systemauslegungen im Makrosinusversuch und Spurwechselversuch zu bewerten.

Zum Nachweis eines kausalen Zusammenhangs der Phasendifferenz auf die Fahrerbewertung ist es zwingend notwendig, die auf den Lenkwinkel bezogene stationäre Gierverstärkung bei Variation der Hinterachsenlenkübersetzung konstant zu halten. Die dazu notwendige und gewählte vordere Lenkübersetzung ist in Kapitel 4.2.2 angegeben. Ohne die Anpassung der vorderen Lenkübersetzung ist ein Nachweis eines kausalen Zusammenhangs zwischen Phasendifferenz und Bewertung der Fahrer nicht möglich.¹⁰⁵

Neben der Korrektur der vorderen Lenkübersetzung zur Konstanz der stationären Gierverstärkung müssen auch die Schräglauftiefen zur Bestimmung der Hinterachsenlenküber-

¹⁰⁴ Im Makrosinusversuch wird der Zeitverzug mittels der Grundfrequenz bestimmt (siehe auch Gleichung 6.9, S.67), während der Zeitverzug im Spurwechsel aus der Kreuzkorrelation von Querschleunigung und Gierrate ermittelt wird.

¹⁰⁵ Hill nach Stamer (1997): Ermittlung optimaler Pkw-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung, S. 16

setzung angepasst werden. Es werden in regelmäßigen Abständen Kalibrierfahrten durchgeführt, anhand deren Ergebnisse die eingestellte Phasendifferenz bewertet und nachjustiert werden kann.

5.1.2 Fazit Versuche zur Systemauslegung

Mit den gewählten instationären Manövern werden zwei unterschiedliche Versuche abgebildet und eine objektive Bewertung der relevanten Bewegungsgrößen messtechnisch zugänglich gemacht. Mit dem Makrosinusversuch werden die Vorteile einer hohen Wiederholrate, eine Exposition der Phasenunterschiede (monofrequent), einer hohen Lenkaktivität und einer längerer auf hohem Niveau liegende Fahrerbeanspruchung kombiniert. Mit dem Spurwechselversuch wird eine einzelne Lenkaufgabe abstrahiert, die den Fahrer nach dem Wechsel der Pylonengasse eine präzise Spurhaltung abverlangt. Während für den Spurwechselversuch ein Ausweichmanöver (keine Rückkehr auf die verlassene Fahrspur) assoziiert werden kann, wird für den Makrosinusversuch kein vergleichbares Analogon aus dem Erfahrungsbereich der Probanden gefunden. Mit der Auswahl dieser beiden Manöver wird eine manöverabhängige Gewichtung der Bewegungsgrößen Querschleunigung und Gierrate berücksichtigt.¹⁰⁶ Die Bewertung der Systemauslegung im Paarvergleich wird für die Fahrer durch eine unmittelbare Abfolge zweier unterschiedlicher Einstellungen erleichtert. Durch Anpassung der vorderen Lenkübersetzung wird der Nachweis eines kausalen Zusammenhangs zwischen der Phasendifferenz von Querschleunigung und Gierrate und der Bewertung der Fahrer unter manöverspezifischer Beanspruchung ermöglicht.

5.2 Versuchsaufbau zur Systemstörung

Vergleichbar zu den Versuchen der Systemauslegung bildet auch in den Versuchen zur Systemstörung das fehlerfreie Befahren eines Parcours das objektive Leistungsmaß für den Fahrer. Der Parcours zur experimentellen Untersuchung der Systemstörung besteht aus einem geraden Fahrstreifen von rund 200 m Länge. Der Rand des Fahrstreifens ist mit Pylonen im Abstand von 15 m markiert. Die Breite des Fahrstreifens wird abhängig von der Fahrgeschwindigkeit gewählt (Tabelle 5.3).

Die Fahrstreifenbreite orientiert sich an der Richtlinie zur Sicherung von Arbeitsstellen, die für die Untersuchungsgeschwindigkeiten minimal zulässige Fahrstreifenbreiten angibt.¹⁰⁷ Das gewählte Versuchsdesign hat sich bereits in mehreren Versuchen zur Untersuchung des Ausfallverhaltens von Lenksystemen bewährt.^{108,109} Das Versuchsdesign leitet sich aus einem Worst-Case-Szenario ab und bildet für den Fahrer die zu Korrektur der Störung ungünstigsten Bedingungen von Fahrstreifenbreite und Fahrgeschwindigkeit (siehe Tabelle 5.3) ab. Um dieses Szenario so realitätsnah wie möglich abbilden zu können, wird die Systemstörung vom

¹⁰⁶ Sano et al. (1979): The Effect of Improved Vehicle Dynamics on Drivers Control Performance

¹⁰⁷ Kühn, Goerner (2002): Strassenbau A-Z digital

¹⁰⁸ Schmidt (2007): Wann spürt der Fahrer überhaupt?

¹⁰⁹ Ullmann et al. (2006): Der Normalfahrer als Messgröße für die Optimierung und Absicherung aktiver fahrdynamischer Regelsysteme

Geschwindigkeit [km/h]	Fahrstreifenbreite [m]	
50	2,5	Gerade
50	3	Kurve
100	3	Gerade
150	3,75	Gerade

Versuchsbetreuer innerhalb der Pylonengasse aufgeschaltet. Der Ort der Störung wird dabei vom Versuchsbetreuer frei innerhalb der Pylonengasse variiert.

Für Versuche mit einer Versuchsgeschwindigkeit von 150 km/h werden zur Visualisierung des Fahrstreifens Markierungen in Form von Linien auf der Fahrbahn eingesetzt, da eine Kollision mit einer Pylone das Fahrzeug zu stark beschädigen und eine Fortsetzung der Versuche mit dem Probanden nicht mehr möglich wäre. Die Ermittlung des Leistungsmaßes muss in diesen Versuchen visuell durch den Versuchsbetreuer erfolgen und in der anschließenden Auswertung durch aufgezeichnete GPS-Daten bestätigt werden.

Neben der Untersuchung von Systemstörungen in Geradeausfahrt ist auch die Untersuchung von Systemstörungen in Kurvenfahrt von Interesse, da hier eine identische Störung aufgrund der Querkräfte eine gegenüber der Geradeausfahrt abweichende Fahrzeugreaktion erwarten lässt. Mit Rücksicht auf äußere Randbedingungen des Versuchsgeländes werden Systemstörungen in einer stationären Kurvenfahrt bei 50 km/h untersucht. Dazu wird analog zu den Geradeausfahrten eine Pylonengasse mit einem Radius von 60 m und einer durch Pylonen begrenzten Fahrstreifenbreite von 3 m eingesetzt. Die Fahrstreifenbreite in diesem Parcours ist ein Kompromiss aus der Möglichkeit zum fehlerfreien Befahren einerseits und einem zu der Geradeausfahrt vergleichbaren Korrekturraum andererseits. Eine eindeutige Vorgabe für die Breite der Kurve gibt es in der Literatur nicht, da die Fahrstreifenbreite in Kurven nach ihrer Lage (innerstädtisch oder außerhalb eines Stadtbereichs), nach Verkehr (viel befahren, wenig befahren) und Straßenklasse individuell ausgelegt werden.^{110,111} Beim Befahren des Parcours stellt sich eine Querbeschleunigung von $3,2 \text{ m/s}^2$ ein, die im Erfahrungsbereich der Fahrer für diese Geschwindigkeit liegt.¹¹² Abbildung 5.3 zeigt den Parcours, der zur Untersuchung der Systemstörung unter stationärer Querkraftbeanspruchung eingesetzt wird. Der Parcours kann wegen seiner asymmetrischen Konzeption nur aus einer Richtung befahren werden. Aufgrund der Richtungsgebundenheit und des vorhersehbaren Zeitpunkts der Störungsaufschaltung wird der Parcours nicht zu Beginn einer Versuchssession eingesetzt.

¹¹⁰ Schneider et al. (2008): Bautabellen für Architekten

¹¹¹ Kühn, Goerner (2002): Straßenbau A-Z digital

¹¹² Hackenberg et al. (1982): Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr

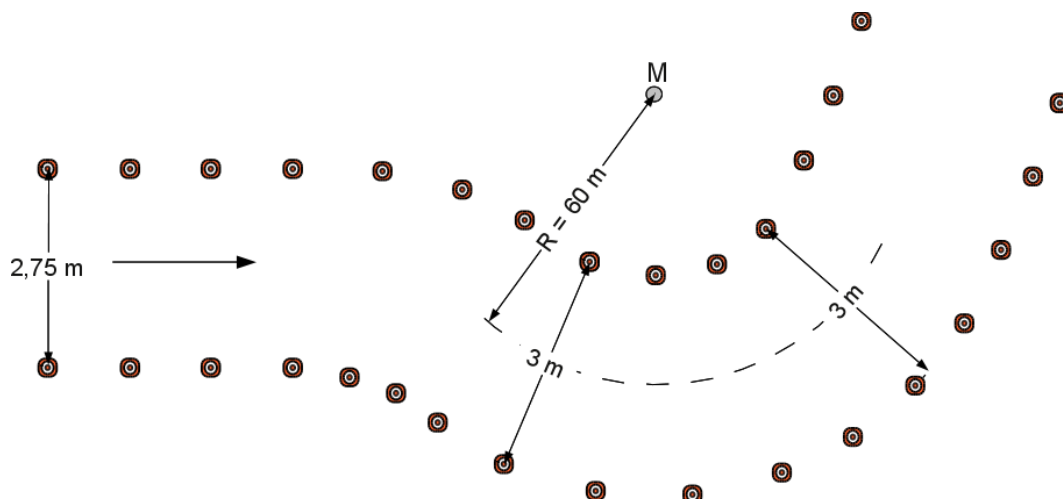


Abbildung 5.3: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Systemstörung in Kurvenfahrt bei 50 km/h

5.2.1 Versuchsplanung zur Systemstörung

Die Störung der Fahrzeugbewegungen um die Hochachse ist vom Ort und Betrag der Störungskraft abhängig. Aus bereits publizierten Untersuchungen ist bekannt, dass sowohl in Open-Loop Versuchen als auch in Closed-Loop Versuchen eine anhaltende Störung (irreversible Störaufschaltung) von Fahrern kritischer bewertet werden als Störungen, die nur zeitlich begrenzt¹¹³ wirken (reversible Störaufschaltung).¹¹⁴ Eine irreversible Störung wird hier durch eine sprungartige Änderung des Radlenkwinkels der Vorderräder oder der Hinterräder dargestellt. Für Störungen durch das hintere Lenksystem wird in Open-Loop Versuchen in irreversiblen Störaufschaltungen eine größere Störung der Fahrzeugbewegung nachgewiesen als für betragsgleiche reversible Störaufschaltungen. Da im Feldversuch die von Fahrern noch tolerierte Störung durch das hintere Lenksystem zu untersuchen ist, werden daher hier nur irreversible Störaufschaltungen untersucht.

Zur besseren Übertragbarkeit auf spätere reale Einsatzszenarien einer Hinterachslenkung werden in dieser Untersuchung zwei mögliche Einbaukonzepte der Aktoren berücksichtigt: Bei einem Aktor mit durchgehender Spurstange wirkt eine Störung auf beide Räder der Hinterachse (symmetrische Störung).^{115,116} Werden zwei Aktoren zur Anlenkung der Hinterräder eingesetzt (z. B. als Spurstangenaktoren), wird hier davon ausgegangen, dass es zur Störung der Fahrzeugbewegung nur durch einen der beiden Aktoren kommt (asymmetrische Störung). Zur Untersuchung der unterschiedlichen Einbaukonzepte der Aktoren werden im Open-Loop Versuch mit fixiertem Lenkrad beide Störungen im Vorfeld untersucht. Dabei wird die einseitige Störung mit doppeltem Störwinkel am Rad aufgeschaltet, um eine

¹¹³ Eine zeitlich begrenzte Störung muss vor Beginn der Fahrerreaktion zurückgenommen werden. Anderfalls fallen Störungsrücknahme und Fahrerreaktion zeitlich zusammen, die von Fahrern dann als Doppelstörung wahrgenommen werden.

¹¹⁴ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures

¹¹⁵ Herold et al. (2008): Die Integral Aktivlenkung, S. 106

¹¹⁶ Ein simulierter Stör-Lenkswinkel an beiden Hinterrädern deckt auch einen unmotivierten Stelleingriff beider Aktoren aufgrund einer gemeinsamen Ursache (Common Modes Failures) ab.

vergleichbare Störkraft an der Hinterachse zu erreichen. Der fahrereinflussfreie Vergleich zeigt, dass die Störung der Fahrzeugbewegung für beide Störungsarten identisch ist. Mit einer beidseitigen Störung kann jedoch eine insgesamt größere Störkraft bei vollem Störwinkel von jeweils $1,6^\circ$ Störwinkel erreicht werden (siehe Anhang Kapitel 10.6). Für die Closed-Loop Versuche (mit Fahrereinfluss) kann eine unterschiedliche Bewertung nicht ausgeschlossen werden, da infolge des Fahrereinflusses die Fahrzeugreaktion auf Störungen unterschiedlich sein können. Im Fall einer einseitigen Störung wird vor der Untersuchung davon ausgegangen, dass die Störung kritischer bewertet wird, wenn das störungsverursachende Hinterrad im Verlauf der Störung das kurvenäußere¹¹⁷ Rad ist. Geht die Störung vom kurveninneren Rad aus, fällt die Störung der Fahrzeugbewegung im Vergleich zur symmetrischen Störung geringer aus. Grund für diese Reaktion ist die höhere Vertikalkraft des kurvenäußeren Rades. Das kurvenäußere Rad kann durch die dynamische Vertikalkraft eine höhere Störquerkraft ausbilden, als das kurveninnere Rad bei gleichzeitiger Entlastung kompensieren kann.

In Tabelle 5.4 sind die Störwinkel an Vorder- und Hinterachse angegeben. Diese werden in beide Richtungen im einseitigen Blindversuch den Fahrern zur Bewertung im Fahrversuch aufgeschaltet. Die Richtungen der Störungen werden dabei so variiert, dass der Proband nicht auf die Richtung der folgenden Störung schließen kann. Asymmetrische Störungen (nur rechtes Hinterrad) werden aufgrund ihrer größeren Störung der Fahrzeugbewegung nur in Richtung Nachspur untersucht.^{118,119} Sie werden im Verhältnis zu anderen Störungen doppelt so häufig aufgeschaltet, um eine gleich große Anzahl von Stichproben zu erhalten. Bei der Planung der Versuche wird davon ausgegangen, dass die Bewertung unabhängig von der Störungsrichtung ist, da in anderen Untersuchungen eine Abhängigkeit der Störungsrichtung von der Bewertung der Fahrer nicht nachgewiesen werden konnte.¹²⁰

Aufgrund technischer Einschränkungen des hinteren Lenksystems können an der Hinterachse nur Störwinkel bis $1,6^\circ$ Radlenkwinkel aufgeschaltet werden. Störwinkel von 3° und 4° an der Vorderachse werden hier aufgenommen, um eine externe Validität der Untersuchung über bereits publizierte Störaufschaltung der Vorderachse leisten zu können.

117 Durch den Lenkwinkel eines Hinterrades kommt es zu einer Kurvenfahrt des Fahrzeugs. Im Open-Loop Versuch wird die Fahrt bis in den stationären Zustand fortgesetzt, im Closed-Loop Versuch korrigiert der Fahrer nach initialer Störung die „Kurvenfahrt“ innerhalb des vorgegebenen Korrektorraums (Pylonengasse).

118 Kudritzki, Willumeit (1988): Rear Axle Steering by Variable Rear Wheel Toe: A Possibility to Optimize Transient Response of Automobiles from the Driver's View too, S.1622

119 Die entstehende Querschleunigung infolge eines Stör-Lenkwinkels eines Hinterrades belastet in der auf die Störung folgenden Kurvenfahrt das kurvenäußere Rad (Radlastverlagerung), wodurch der Querkraftanteil des kurvenäußeren Rades an der Achsquerkraft der Hinterachse zunimmt. Eine Nachspur des störungsverursachenden Rades führt zu so zu einer Belastung und damit auch zu einem größeren Kraftanteil des störungsverursachenden Rades an der Hinterachsquerkraft. Ein Stör-Lenkwinkel eines Hinterrades in Vorspur führt zu einer Entlastung des störungsverursachenden Rades und zu einer Belastung des ungestörten Hinterrades. Die Störung der Fahrzeugbewegung durch ein Hinterrad in Vorspur ist daher geringer.

120 Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien

VA [°]	HA_{sym} [°]	HA_{asym} [°]
± 0,2*	± 0,2*	- 0,4
± 0,4	± 0,4	- 0,8
± 0,8	± 0,8	- 1,6
± 1,6	± 1,6	
± 3,0		
± 4,0		

Zur Vermeidung des Bereichseffekts in der Störungsbewertung werden große Störaufschaltungen innerhalb der ersten vier Versuche dargestellt, wobei die ersten beiden Störaufschaltungen an unterschiedlichen Achsen dargestellt werden müssen. Tabelle 5.5 zeigt die möglichen Erststörungen. Durch Aufzeigen einer großen Störungen am Anfang der Untersuchung wird hier sichergestellt, dass der Fahrer seine Einschätzung der Störung frühzeitig auf die angebotene Störungsbewertungsskala anpassen kann.

Störamplitude [°]	Störungsart
± 0,8	VA
± 1,6	VA
± 0,8	HA _{sym}
± 1,6	HA _{sym}
- 0,8	HA _{asym}
- 1,6	HA _{asym}

Um eine unvoreingenommene Einschätzung der Störung zu erhalten, werden die Fahrer erst nach dem ersten Fehler über das Bewertungsinstrument und das Untersuchungsziel informiert. In den verbleibenden Versuchen wird jede Störung dem Fahrer zur Bewertung dargestellt, wobei die Richtung der Störungen über die Fahrer permutiert wird, sodass eine Störung pro Geschwindigkeit nur einmal gefahren werden muss. Zusätzlich wird durch zwei Retests die Erststörung und eine weitere Störung sowie eine Nullstörung in den Versuchen berücksichtigt.

Die Nullstörung erfordert vom Versuchsbetreuer und Fahrer identische Handlungen, jedoch ohne eine Störung der Fahrzeugbewegung hervorzurufen. Für die Untersuchung der Systemstörung werden von jedem Fahrer 16 Störaufschaltungen bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewertet.

Bei der Störungsbewertung im stationären Teil der Kurvenfahrt werden Störaufschaltungen von $0,2^\circ$ nicht untersucht, da in Vorversuchen eine Nullstörung nicht von kleinen Störaufschaltungen von den Fahrern unterschieden werden konnte. Es wird hier die erhöhte Regeltätigkeit des Fahrers in der Kurvenfahrt angenommen, sodass kleine Störungen im Rahmen der fertigkeitsbasierten Handlung kompensiert werden und als Störung der Fahrzeugbewegung nicht wahrgenommen werden. Mit gleicher Begründung wird auch auf die Nullstörung verzichtet, wodurch nur 13 Bewertungsfahrten in der Kurvenfahrt durchgeführt werden.

5.2.2 Fazit Störungsversuche

Zur Untersuchung der Systemstörung wird ein bewährtes Untersuchungskonzept auf die Störung der Fahrzeugbewegung durch das hintere Lenksystem angewandt. Durch die gemeinsame Untersuchung der Störungen von vorderem und hinterem Lenksystem kann auch der Einfluss der unterschiedlichen Kraft und Momentenpfade identifiziert werden. Zusätzlich zum bewährten Untersuchungskonzept in Geradeausfahrten werden hier Störungen in stationärer Kurvenfahrt untersucht, da hier, durch die unterschiedlichen Einbaukonzepte der Aktoren, Unterschiede in der Störungsbewertung erwartet werden.

5.3 Erfassung der Fahrerurteile

Für Untersuchungen der Systemauslegung und der Systemstörung ist eine reliable Einschätzung der Fahrer bezüglich Unterschiedlichkeit der Systemauslegungen bzw. der Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs (als wahrnehmbare Folge der Systemstörung) notwendig. Aufgrund der unterschiedlich gewählten Versuche zur Analyse der Systemauslegung und der Systemstörung müssen auch unterschiedliche Erfassungsmethoden der Fahrerbewertung eingesetzt werden.

5.3.1 Systemauslegung

Die gemeinsame Erhebung von fahrdynamischen Daten und Fahrerurteilen soll den Beleg erbringen, dass die Fahrer anhand zweier unterschiedlicher Phasendifferenzen aus Querbeschleunigung und Gierrate Fahrzeugauslegungen unterscheiden können. Wenn der Nachweis erbracht wird, muss mithilfe der Erhebung die Größe der Phasendifferenz ermittelt werden, bis zu der Fahrer Systemauslegungen anhand der Phasendifferenz sicher unterscheiden können (siehe Kapitel 4.4). Zur Bewertung der Phasendifferenzen wird eine relative Bewertungstechnik gewählt, um einen Einfluss des fahreigenen (Referenz)-Fahrzeugs zu

vermeiden. In einem Paarvergleich wird es ermöglicht, zwei unterschiedliche Systemauslegungen in kurzer zeitlicher Abfolge relativ zueinander zu bewerten.

Die Bewertbarkeit der Fahrzeugreaktion durch normal geübte Fahrer erfordert, dass das Erhebungswerkzeug den Untersuchungsgegenstand weitgehend vollständig erfasst. Die zur Bewertung des Untersuchungsgegenstands wichtigen Größen werden in Form von leicht verständlichen Fragen, direkt nach einer erfolgreichen Bewältigung eines Parcours durchgeführt.

Eine in den Versuchen wichtige Größe ist der Lenkradwinkel, da die modifizierte Fahrzeugantwort direkt von dem Lenkradwinkel abhängig ist. Neben dem Lenkradwinkel ist noch das Lenkradmoment durch die kinästhetische Wahrnehmung des Fahrers eine wichtige Bewegungsgröße, weshalb sie durchaus für eine Bewertung der Unterschiede der Fahrzeugreaktionen herangezogen werden könnte.^{121,122} Das eingesetzte Lenksystem der Vorderachse lässt jedoch keine Anpassung des Lenkradmomentes zu, sodass diese Größe in den Versuchen nicht kontrolliert werden kann. Das Lenkradmoment ist hier abhängig von dem eingeschränkten individuellen Lenkverhalten der Fahrer beim Durchfahren des Parcours und von der aus der gefahrenen Trajektorie resultierenden Querbewegung. Da Abweichungen von der Fahrgeschwindigkeit als auch der Trajektorie nur in geringem Maß möglich sind, wird das Lenkradmoment durch eine Bewertung nicht explizit erfasst. Von dem Eingabedisplay Lenkrad verbleibt als bewertbare Größe der Lenkradwinkel.

Die übrigen Betätigungseinrichtungen des Fahrzeugs, wie Pedale und Schaltung, finden während der Parcoursdurchführung keine Verwendung, sodass die damit beeinflussbaren Größen bezüglich einer Bewertung hier nicht weiter zu berücksichtigen sind.

Zur Bewertung der Fahrzeugbewegung sind in diesen Versuchen die Querbewegung und die Drehbewegung um die Hoch- (Gierbewegung) und Längsachse (Wankbewegung) des Fahrzeugs mögliche Bewertungsgrößen. Eine Änderung der Wankbewegung kann hier auf den zeitlichen Verlauf der Querbewegung zurückgeführt werden, da während der Versuche keine Änderungen der Aufbaufedern und Dämpfern vorgenommen werden. Für die Bewegungsgrößen um die Hochachse können die Gierrate, Gierbeschleunigung und der Schwimmwinkel als Bewertungsgröße gewählt werden.

Zur sicheren Wahrnehmung des Schwimmwinkels muss dieser während der Fahrt größer als 4° ¹²³ betragen. Da nicht alle Systemauslegungen diesen Schwimmwinkelbetrag im Versuch erreichen, wird er hier als Bewertungsgröße zurückgestellt.

Gierrate und Gierbeschleunigung sind Bewertungsgrößen, die vom Fahrer unmittelbar erfasst werden können, und sind daher als Bewertungsgrößen prädestiniert.^{124,125} Durch die Sensorik des Vestibularapparats, Kinästhetik und haptische Wahrnehmungen des Fahrers wird die

121 Schmidtke, Bernotat (1993): Ergonomie, S. 382

122 Förster (1991): Der Fahrzeugführer als Bindeglied zwischen Reifen, Fahrwerk und Fahrbahn, S. 17f

123 Kudritzki (1989): Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens, S.7

124 Silbernagl et al. (1991): Taschenatlas der Physiologie, S. 298

125 Klinka et al. (2005): Lehrbuch Physiologie, S.680

Querbeschleunigung durch mehrere Sinnesorgane erfasst, sodass die Querbeschleunigung als eine weitere wichtige Bewertungsgröße angenommen wird.

Zur Erhebung der unterschiedlichen Systemauslegungen verbleiben als Bewegungsgrößen Lenkradwinkel, Gierrate/Gierbeschleunigung und Querbeschleunigung. Das Versuchsdesign stellt sicher, dass die Wahrnehmungsschwellen der Bewegungsgrößen überschritten werden. Aus den verbleibenden Bewertungsgrößen bieten sich besonders Fragen an, die die Querbeschleunigung bzw. die Gierrate referenzieren, da der zeitliche Zusammenhang zwischen beiden Größen in Manövern gezielt variiert wird. Da die Untersuchungsmethodik einen relativen Vergleich der Systemauslegungen vorgibt, werden auch die Fragen als Änderung des Fragensubjekts formuliert (siehe Tabelle 5.6).

Frage zur/ zum	Fragentext
Schnelligkeit	„Bei welcher Variante spricht das Fahrzeug auf einen Lenkeinschlag schneller an?“
Direktheit	„Welche Variante reagiert direkter auf Lenkbefehle?“
Beanspruchung	„Bei welcher Variante ist es Ihnen leichter gefallen, die Fahraufgabe zu bewältigen?“
Überschwingen*	„Welche Variante neigte stärker zum Überschwingen?“

Mit der Frage zur *Schnelligkeit* der Fahrzeugreaktion auf die Lenkeingabe wird ein Zusammenhang zwischen der Fahrzeugeingabe und der Fahrzeugantwort erfragt.^{126,127} Auf einen konkreten Bezug einer Bewegungsgröße wird verzichtet, da im Vorfeld der Untersuchung nicht eindeutig geklärt werden konnte, mit welcher Qualität normal geübte Fahrer Querbeschleunigung und Gierrate voneinander unterscheiden können. Um eine Missinterpretation bezüglich der empfundenen Ansprechzeit des Fahrzeugs auf die Lenkeingaben vorzubeugen, wird der zeitliche Zusammenhang der Lenkeingabe und der Fahrzeugantwort durch eine Parallelfrage zur *Direktheit* der Fahrzeugreaktion nochmals überprüft.^{128,129}

Eine fahrerindividuelle, aber robuste Größe zur Bewertung einer geänderten Fahrzeugreaktion, ist die Beanspruchung der Fahrer während der Durchführung der Manöver. Die Frage zur *Beanspruchung* bei der Bewältigung der Fahraufgabe fokussiert die fahrerindividuelle Güte der Erfüllung der Fahreraufgabe. Dabei wird der Maßstab der Güte vom Fahrer selbst gesetzt und ist in der Untersuchung nicht bekannt. Jedoch wird durch die Be-

126 Zomotor (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, S.224

127 Stamer (1997): Ermittlung optimaler Pkw-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung, S.12

128 Zomotor (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten

129 Stamer (1997): Ermittlung optimaler Pkw-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung

wertung der Grad des Aufwands zur individuellen Erfüllung der Fahraufgabe erfasst. Es wird hier auf Untersuchungserkenntnissen aufgebaut, wonach eine Bewertung differenzierter ausfällt, wenn eine Mindestanforderung überschritten, aber eine Überforderung der Fahrer durch die Fahraufgabe vermieden wird.¹³⁰ Die Manöver werden daher derart ausgelegt, dass die zur Befahrung notwendige Querbeschleunigung im oberen Bereich der von Fahrern im Alltag genutzten Querbeschleunigungen liegt, sodass der Parcours anspruchsvoll, aber für jeden normal geübten Fahrer bewältigbar ist.^{131,132}

Für die Versuche im Spurwechsel wird zusätzlich nach dem *Überschwingen* des Fahrzeugs um die Fahrzeughochachse über den stationären Manöverendzustand gefragt. Durch den stationären Endzustand im Spurwechselversuch (geradlinige Ausfahrt durch die Ausfahrtsgasse, siehe auch Abbildung 5.2, S. 39) könnten Fahrer ein Überschwingen des Fahrzeughecks für einzelne Varianten wahrnehmen. Die Frage soll die Möglichkeit zur Berücksichtigung der vom Fahrer notwendigen Lenkkorrekturen in der Ausfahrtsgasse des Spurwechselversuchs geben.¹³³ Der Fahrer hat durch den Wechsel Gerade-Kurve-Gerade besonders in diesem Versuch die Möglichkeit den Anteil notwendiger Lenkkorrekturen aufgrund der geänderten Systemauslegung zu identifizieren.

Zur Erfassung der Fahrerbewertungen wird eine zweiseitige siebenstufige ordinale Skala eingesetzt. Die siebenstufige Skala bietet je drei unterschiedlich starke Ausprägungen (wenig, mittel, stark) zugunsten der ersten oder zweiten Systemauslegung an. Die Mitte der Skala definiert ein indifferentes Urteil. Der Fragebogen zur Erfassung der Urteile ist im Anhang (Kapitel 10.4) vollständig angegeben.

Bei dieser Erhebung wird die mittlere Bewertung nicht in „Indifferenz“ oder „Unmöglichkeit der Bewertung“ unterschieden, da bei beiden Interpretationen der Fahrer keine Unterscheidung der Systemauslegungen vornehmen kann oder möchte. Die Aussage, dass kein Unterschied zwischen den Systemauslegungen bewertet wird, ist für die Auswertung ausreichend.

Die Erfassung der Bewertungen wird durch den Versuchsbegleiter vorgenommen. Nach Abschluss des Versuchsszenarios wird die Fahrerbewertung zu jeder Frage elektronisch erfasst, um Fehler in einer sonst notwendigen Übertragung von Papier in EDV zu vermeiden. Um vergleichbare Fehler bei der Eingabe zu vermeiden, muss die vom Versuchsbetreuer elektronisch dokumentierte Bewertung verbal vom Fahrer bestätigt werden, um so bereits kurz nach der Eingabe validiert zu werden. Um die elektronische Bewertung für den Fahrer zu erleichtern, wird während der Bewertung eine Kopie des Fragebogens im Blickfeld des Fahrers befestigt, um auch dem Fahrer eine visuelle Einordnung seiner Ergebnisse zu ermöglichen. Alle Fragen des Fragebogens sind richtungsgleich¹³⁴, sodass eine stärkere Ausprägung der Merkmale für alle Fragen in die gleiche Richtung der Skalen weist.

130 Krüger et al. (1999): Bewertung von Fahrzeugeigenschaften - Vom Fahrgefühl zum Fahrergefühl

131 Hackenberg et al. (1982): Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr

132 Förster (1992): Der Fahrzeugführer, ein Homo Instrumentalis, S.438

133 Redlich (1994): Objektive und subjektive Beurteilung aktiver Vierradlenkstrategien, S. 88

Die zur Bewertung eingesetzte Skala ist eine Kategorienskala, die jeweils nur Bewertungen in der angebotenen Abstufung (geringe, mittlere und starke Ausprägung) eines Merkmals zulässt. Durch die Stärke der Ausprägung kann eine Reihenfolge der Bewertung ermittelt werden. Eine Interpretation der Intervalle zwischen den Ausprägungen ist jedoch nicht sinnvoll möglich. Diese Eigenschaft muss in der Auswertung der Fahrerbewertungen durch eine geeignete Wahl der statistischen Methoden berücksichtigt werden. Eine Verankerung der Skala ist durch die Mitte (kein Unterschied zwischen den Systemauslegungen) und den größten Unterschieden der Systemauslegungen (Variante 0 und 4) gegeben.

5.3.2 Systemstörung

Die subjektive Einschätzung einer Störung der Fahrzeugbewegung durch den Fahrer stellt neben den objektiven Messdaten einen wichtigen Teil zur Einschätzung der Beherrschbarkeit eines Fahrzeugs im Fall einer Systemstörung dar. Der Fahrer dient hierbei als komplexes Messinstrument, das durch ein Beurteilungsinstrument zugänglich gemacht wird. Aufgabe des Beurteilungsinstruments ist dabei die Abbildung der subjektiven Einschätzung einer Systemstörung auf einer kardinalen Skala. In zahlreichen Untersuchungen ^{135,136,137} hat sich eine zweigestufte Störungsbewertungsskala (SBS)¹³⁸ bewährt (siehe Abbildung 5.4).

Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar	10
Gefährlichkeit	9
	8
	7
Störung des Fahrens	6
	5
	4
Spürbarkeit	3
	2
	1
Nichts bemerkt	0

Abbildung 5.4: Skala zur Bewertung der Auswirkung einer Störung

Entsprechend dem zweistufigen Aufbau der Skala erfolgt auch die Bewertung der Störung zweistufig: Im ersten Schritt erfolgt eine grobe Klassifizierung über die verbale Zuordnung

¹³⁴ Durch eine richtungsgleiche Darstellung der Merkmale wird verhindert, dass Bewertungsfehler seitens der Fahrer durch einen Seitentausch der zu bewertenden Systemauslegungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fragen entsteht (vgl. Kapitel 10.4).

¹³⁵ Ullmann et al. (2006): Der Normalfahrer als Messgröße für die Optimierung und Absicherung aktiver fahrdynamischer Regelsysteme

¹³⁶ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures

¹³⁷ Schmidt et al. (2007): Auswirkung haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug System

¹³⁸ Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien

(siehe linke Spalte der Abbildung 5.4) und im zweiten Schritt eine detaillierte Bewertung auf der kardinalen Skala (siehe rechte Spalte der Abbildung 5.4), entsprechend der im ersten Schritt angegebenen Ausprägung. Die beiden äußeren Ausprägungen „Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar“ und „nichts bemerkt“ sind für den Fahrer eindeutig und verankern damit auch die kardinale Skala an der Einschätzung der Fahrer. In der Ausprägung „gefährlich“ werden Störungen zuordnet, deren Kompensation dem Fahrer einen erheblichen Aufwand abverlangt und die von den Fahrern unter normalen Fahrbedingungen als gefährlich eingeschätzt werden. Eine hohe gefährliche Störung (Skalenwert 9) wird damit eindeutig von einer Unbeherrschbarkeit des Fahrzeuges (Skalenwert 10) abgegrenzt. Die Ausprägung „Störung des Fahrens“ erfordert vom Fahrer einen geringen Aufwand zur Kompensation und stellt einen noch vertretbaren Aufwand dar. Unter „Spürbarkeit“ werden alle Störungen erfasst, die vom Fahrer bemerkt werden, aber keinen oder nur geringen Einfluss auf die Umsetzung der Fahraufgabe haben.

Die Befragung der Fahrer erfolgt unmittelbar nach Bewältigung der Fahraufgabe. Damit alle Fahrer die Bewertungsskala identisch auffassen, werden sie nach der Erststörung ausführlich mit dem Bewertungsinstrument vertraut gemacht und über dessen Anwendung vom Versuchsbetreuer unterrichtet. Sie werden aufgefordert, sich vom Feldversuch zu lösen und die Situation anhand einer realen Verkehrssituation zu bewerten.

Das äußere Leistungsmaß für diesen Versuch wird durch ein Umfallen der Pylonen für den Fahrer leicht nachvollziehbar angezeigt. Das Ziel ist die Störung durch das Lenksystem derart zu kompensieren, dass das Fahrzeug den zur Verfügung stehenden Fahrstreifen nicht verlässt.¹³⁹

Damit alle Störungen unter gleichen Bedingungen erfasst werden, wird vom Versuchsbetreuer direkt nach der Störung bestätigt, dass während der Störung beide Hände das Lenkrad umgreifen. Befindet sich eine Hand nicht am Lenkrad, liegt eine geringere Abstützung des Lenkradmomentes durch den Fahrer vor, wodurch wiederum eine geringere Störung der Fahrzeugbewegung resultiert. Auch ist der Fahrer bei einhändiger Fahrweise in seiner Handlung eingeschränkt, sodass eine Kompensation der Störung nur unvollkommen möglich ist.

Zur leichteren und sicheren Auswertung werden die Fahrerbewertung, das Leistungsmaß und die korrekte Fahrerankopplung elektronisch durch den Versuchsbetreuer erfasst. Die elektronische Erfassung der Bewertungen steigert die Auswerteobjektivität durch eine mögliche personenunabhängige Auswertung. Um Fehleingaben bei der Erfassung der Bewertung zu minimieren, muss auch in diesen Versuchen die elektronisch erfasste Bewertung durch den Fahrer verbal bestätigt werden.

¹³⁹ Das Verlassen des Fahrstreifens wird als nicht mehr kontrollierbare Fahrzeugreaktion bewertet. Diese Versuche liefern keinen Hinweis auf die *tolerierte* Störung der Fahrzeugbewegung.

5.3.3 Gütekriterien

Die für die Untersuchung notwendige Erhebung der Fahrerurteile wird mithilfe der Fragebogentechnik durchgeführt. Die Qualität der Erhebung kann an den drei zentralen Kriterien Objektivität, Reliabilität und Validität¹⁴⁰ bewertet werden.

5.3.3.1 Objektivität

Mit der Objektivität eines Tests wird die Unabhängigkeit des Testergebnisses von den Testanwendern beschrieben. Die Objektivität eines Tests wird anhand der einzelnen Testphasen in die Durchführungsobjektivität, die Auswertungsobjektivität und die Interpretationsobjektivität weiter unterteilt.

Die Durchführungsobjektivität beschreibt die Unabhängigkeit der Testergebnisse von den betreuenden Personen. Zur Erreichung einer hohen Durchführungsobjektivität wird der gesamte Testablauf vor Beginn der Versuchsreihe vereinbart. In der Vereinbarung wird die Betreuung der Versuchspersonen von der Begrüßung über die Erläuterung der Versuchsaufgabe¹⁴¹, der Fahrzeugeinweisung, der Kommunikation des Versuchsbegleiters im Fahrzeug, zu beantwortbaren und nicht beantwortbaren Fragen bis zur Verabschiedung des Probanden festgelegt. Zentrale Schritte, wie die Information über die Versuche sind schriftlich formuliert, um für alle Versuchsteilnehmer den gleichen Informationsstand sicherzustellen, da mehrere Versuchsbetreuer beteiligt sind. Durch dieses Vorgehen wird der individuelle Einfluss der versuchsbetreuenden Personen auf ein Minimum reduziert.

Eine hohe Auswertungsobjektivität fordert eine Unabhängigkeit der erhobenen Daten von der auswertenden Person. Eine hohe Auswertungsobjektivität ist erreichbar, wenn die Bewertungen der Fahrer bereits im Fahrzeug elektronisch erfasst werden und damit Fehler der Übertragung in die EDV minimiert werden. Alle erhobenen Daten (objektive Messdaten und Fahrerbewertungen) werden anhand versuchseinheitlicher Algorithmen ausgewertet. Ein Einfluss der auswertenden Person kann damit weitgehend ausgeschlossen werden. Die Auswertungsobjektivität der Fahrerbewertungen ist dann nur noch von der Formulierung der Merkmale im Fragebogen abhängig. Durch die Vorgabe der Beantwortungsart und der Antwortbewertung wird auch hier der Einfluss durch die auswertende Person minimiert.

Der dritte Aspekt der Objektivität, die Interpretationsobjektivität, berücksichtigt eine individuelle Deutung der Testwerte durch die auswertende Person. Durch eine feste Zuordnung von abgegebenem Urteil des Probanden zur numerischen Repräsentation und der personenunabhängigen Auswertung durch die EDV ist eine individuelle Beeinflussung der Auswertung ausgeschlossen.

¹⁴⁰ Bortz, Döring (2006): Forschungsmethoden und Evaluation, S. 195

¹⁴¹ Die Erläuterung erfasst auch weitergehende Erklärungen zu den Fragestellungen des Fragebogens im Makrosinus- und Spurwechselversuch, sodass ein gleiches Verständnis der zu bewertenden Fragen durch alle Probanden erreicht wird.

5.3.3.2 Reliabilität

Die Reliabilität eines Tests gibt die Genauigkeit an, mit der das untersuchte Merkmal durch den gewählten Test gemessen wird. Die Reliabilität eines Tests ist umso größer, je kleiner der Fehler ist, der gemeinsam mit den erhobenen Daten erfasst wird.

Bei der Erhebung der Fahrerbewertungen wird davon ausgegangen, dass die Bewertungen um einen wahren (und unbekannten) Wert schwanken. Die Präzision, mit der ein Merkmal durch einen Test gemessen wird, steigt, wenn die Varianz des erfassten Merkmals geringer wird. Die Reliabilität wird daher als Verhältnis aus der wahren Varianz der Merkmale und der beobachteten Varianz der Fahrerbewertungen gebildet. Da die wahre Varianz der Bewertungen unbekannt ist, muss sie durch Verfahren wie die Retest-Reliabilität geschätzt werden. Bei der Ermittlung der wahren Reliabilität eines Tests muss zwischen einer hohen zeitlichen Variabilität oder einer zeitlichen Unabhängigkeit des Merkmals unterschieden werden. Bei hoher zeitlicher Konstanz des Merkmals ist die Retest-Reliabilität geeignet.¹⁴² Sowohl bei der Untersuchung der Systemauslegung als auch bei der Untersuchung der Systemstörung wird davon ausgegangen, dass die Bewertungen der Probanden keinem zeitlichen Einfluss¹⁴³ unterliegen. Mit Berücksichtigung des Versuchsaufwandes wird die Retest-Reliabilität zur Schätzung der wahren Reliabilität gewählt.

Die Retest-Reliabilität wird durch eine zeitlich versetzte Wiederholung eines identischen Tests ermittelt und liefert eine Aussage über die zeitliche Stabilität des bewerteten Merkmals. Zur Vermeidung von Wiederholungseffekten wird der zeitliche Abstand zwischen Test und Retest über die Probanden variiert. Um einer späteren Überschätzung der Reliabilität durch eine Erinnerung der Probanden an die Ergebnisse der Testaufgabe vorzubeugen, werden die Tests im einseitigen Blindversuch nach dem Zufallsprinzip durchgeführt. Somit wird den Probanden keine Möglichkeit gegeben, sich an die Bewertung eines identischen Tests zu erinnern.

5.3.3.3 Validität

Die Validität ist das dritte Kriterium zur Bewertung der Güte eines Tests und beschreibt die gemessene Qualität des zu untersuchenden Merkmals. Die Validität eines Tests kann bei der empirischen Untersuchung von kausalen Zusammenhängen in inhaltliche, interne und externe Validität unterteilt werden.

Mit der Inhaltsvalidität wird angegeben, ob das zu messende Merkmal durch die gestellten Fragen erschöpfend erfasst wird. Im Fall der Systemauslegung ist das zu messende Konstrukt der zeitliche Unterschied zwischen dem Aufbau der Querschleunigung und der Gierrate in instationären Fahrsituationen (Phasendifferenz). Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Fahrer im Fahrversuch eine zeitliche Einschätzung des Gier- und Querschleunigungsaufbaus angeben können, wird die fahrerinterne Beanspruchung bei der

¹⁴² Bortz, Döring (2006): Forschungsmethoden und Evaluation, S. 326

¹⁴³ Eine evtl. Änderung der Bewertung durch veränderte Schräglaufsteifigkeiten wird durch die Zuordnung von Messung und Bewertung in der Varianzanalyse berücksichtigt.

Aufgabenbewältigung (Durchfahren der Fahraufgabe) erfasst.¹⁴⁴ Um eine eventuell vorliegende abweichende Interpretation des zeitlichen Fahrzeugverhaltens zu berücksichtigen, müssen weitere Fragen eingeführt werden, die den Systemausgang (die Fahrzeugbewegung) in Bezug auf den Systemeingang (Lenkrad) beschreiben. Zusätzlich wird den Fahrern die Möglichkeit gegeben, eine veränderte Wankbewegung des Fahrzeugs relativ zu seinen Lenkeingaben zu bewerten. Damit sind die in den Versuchen der Systemauslegung vorkommenden Bewegungsfreiheitsgrade durch Fragen abgedeckt und es kann von einer erschöpfenden Berücksichtigung der wichtigsten Aspekte ausgegangen werden. Im Fall der Systemstörung wird der Grad der Störung des Fahrens durch die in mehreren Untersuchungen bewährte Störungsbewertungs-Skala (SBS) erfasst, deren Inhaltsvalidität bereits gezeigt wurde.¹⁴⁵

Die interne Validität beschreibt den Grad der für die ermittelten Ergebnisse alternativen Erklärungen. Eine direkte Abhängigkeit der unabhängigen Variable auf die abhängige Variable belegt eine hohe interne Validität. Das Erreichen einer hohen internen Validität setzt voraus, dass der Einfluss von Störgrößen kontrolliert ist und die Voraussetzungen der angewandten statistischen Tests erfüllt werden. Um eine hohe interne Validität erreichen zu können, erfolgt die Auswertung ausschließlich auf Basis statistischer Tests (siehe Kapitel 6.1).

Eine externe Validität ist erreicht, wenn die in der Untersuchung gefunden Ergebnisse sich auf die Grundgesamtheit verallgemeinern lassen und die ermittelten Ergebnisse durch externe Tests bestätigt werden. Da nur zu den Tests der Systemstörung an der Vorderachse vergleichbare Ergebnisse publiziert wurden, ist die externe Validität eingeschränkt.¹⁴⁶

5.3.4 Fazit zur Erfassung der Fahrerurteile

Zur Erhebung der Fahrerurteile liegt für die Systemauslegungsversuche im Makrosinusversuch und Spurwechselversuch ein Fragebogen zur relativen Erfassung der bemerkten Unterschiede vor. Für die Versuche der Systemauslegung wird eine bereits bewährte Erfassungsmethodik eingesetzt. Beide Erfassungsmethoden werden, elektronisch unterstützt, im Versuchsfahrzeug umgesetzt. Durch einen schematisierten Versuchsablauf und eine automatisierte Aufbereitung der erhobenen Fahrerbewertungen und Messdaten wird eine hohe Objektivität der Versuche erreicht. Die Reliabilität wird in den Tests durch die Retest-Reliabilität ermittelt. Die inhaltliche Validität der Untersuchung wird durch umfassende Fragestellungen ausreichend beschrieben oder ist für den Störfall bereits nachgewiesen. Die interne Validität wird durch die Anwendung statistischer Tests sichergestellt. Die externe Validität kann nur für die Systemstörung an der Vorderachse gezeigt werden.

144 Neukum et al. (2001): Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften

145 Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien

146 Neukum et al. (2005): Bewertung der Funktionssicherheit aktiver Lenksysteme: ein Human Factor Ansatz

5.4 Probandenkollektiv

Die an der Bewertung der Systemauslegungen und Systemstörung teilnehmenden Probanden wurden als repräsentative Klumpenstichprobe¹⁴⁷ kraftfahrzeuginteressierter Fahrer ermittelt. Mit Fokus auf das Untersuchungsziel wurden hier bewusst keine professionellen Fahrer gewählt, um eine Übertragbarkeit auf die spätere Nutzergruppe zu erleichtern. Insgesamt bewerten 34 Fahrer die Versuche zur Systemauslegung und 33 Fahrer die Versuche zur Systemstörung. Aus versuchsökonomischen Gründen wurden hier ausschließlich männliche Versuchsteilnehmer gewählt, um die Trennschärfe der Versuche nicht durch eine Teilung des Kollektivs zu reduzieren. Eine Beeinträchtigung der Übertragbarkeit der Ergebnisse durch die Wahl des eingeschlechtlichen Probandenkollektivs wird nicht erwartet.^{148,149}

Die Abbildung 5.5 zeigt die Altersverteilung der Probanden in den Versuchen der Systemauslegung und der Systemstörung. Eine Abbildung der bestehenden Demografie konnte nicht erreicht werden. Der Anteil der 25- bis 30-jährigen Fahrer überwiegt hier deutlich. Mit der genannten Ausnahme ist der Altersbelag bis 45 Jahre für beide Versuche in erster Näherung

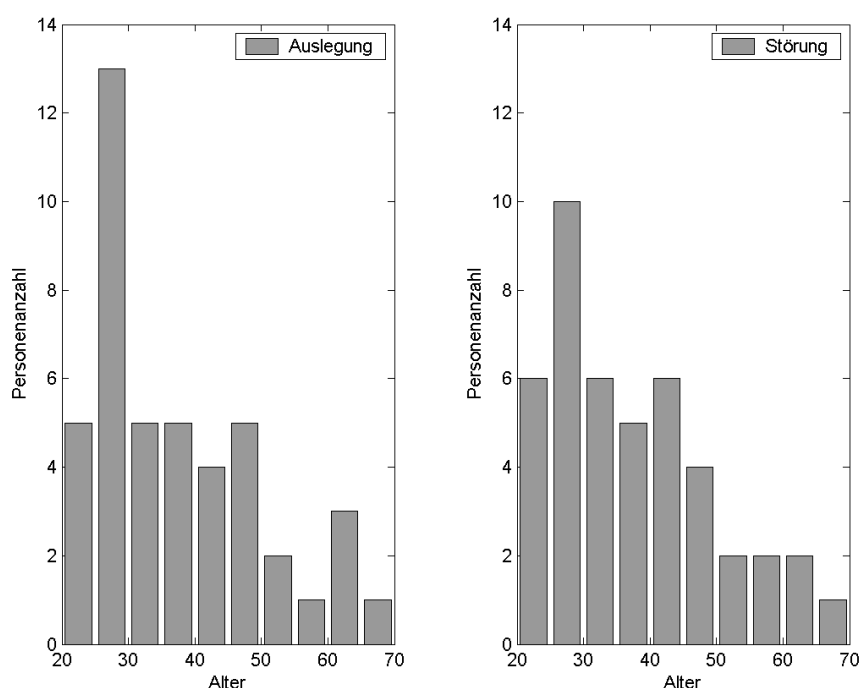


Abbildung 5.5: Altersverteilung der Probanden in den Versuchen zur Systemauslegung (links) und Störung (rechts).

konstant. Die Spannweite des Probandenkollektivs beträgt 42 Jahre und reicht von 23 bis 65 Jahre. Alle teilnehmenden Fahrer haben eine angegebene jährliche Fahrleistung von über 10.000 km.

147 Die Fahrer wurden aus den Besuchern südhessischer Autohäuser akquiriert. Durch die Wahl von geografisch beschränkten Orten (Autohaus) wird die Zufallsauswahl der Fahrer als Klumpenstichprobe eingeordnet.

148 Weir et al. (1978): Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data

149 Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien

5.5 Untersuchungswerkzeug

Zur Untersuchung der Systemauslegung und der Systemstörung wird ein Opel Vectra 2.0 mit einer Überlagerungslenkung an der Vorderachse und einer Hinterachslenkung eingesetzt. Die Lenksysteme werden jeweils von eigenen Steuergeräten (Blackbox) angesteuert und überwacht. Die Ansteuerung kann über Vorgabe einer Lenkübersetzung bezogen auf den Lenkradwinkel (vorderes Lenksystem) oder auf den vorderen Radlenkwinkel (hinteres Lenksystem) erfolgen (Grundfunktionen). Die Grundfunktion des vorderen Lenksystems ist eine konstante Übersetzung von 15,2:1 und für das hintere Lenksystem eine Übersetzung von 0, was einer Deaktivierung entspricht. Alternativ besteht die Möglichkeit, zur Grundfunktion einen definierten Radlenkwinkel zu addieren. Die Lenksysteme erhalten ihre Stellanforderung (Winkelvorgabe oder Übersetzung) über ein Rapid-Prototyping-System¹⁵⁰, das die Bestimmungsgleichungen, Abhängigkeiten und Überwachungsfunktionen enthält. Die Programme des Rapid-Prototyping-Systems werden von einem Bedienrechner aktiviert.

Für die Versuche der Systemauslegung wird sowohl das vordere als auch das hintere Lenksystem mit einer konstanten Übersetzung betrieben (siehe Tabelle 4.2). Die Versuche zur Systemstörung werden mit der Standard-Lenkübersetzung der Vorderachse ($i_s = 15,2$) und der passiven Hinterachslenkung ($k = 0$) durchgeführt. Zur Störung der Fahrbewegung wird ein Lenkwinkelsprung an den Vorder- oder Hinterrädern aufgeschaltet.

Zur Erfassung objektiver Größen stehen neben der fahrzeuginternen Sensorik weitere Messtechnik zur Erfassung des Lenkradwinkels und Lenkradmoments sowie eine Strap-Down-Plattform zur Erfassung der Beschleunigungen und Drehraten zur Verfügung. Die Strap-Down-Plattform¹⁵¹ wird über ein GPS und korrelationsoptischen Geschwindigkeitsmesser gestützt¹⁵² (Abbildung 5.6). Die Daten der Messsysteme werden über CAN (vorderes Lenksystem, hinteres Lenksystem, Fahrzeug und Messtechnik-Netz) vom Bedienrechner erfasst und unmittelbar nach Ende der Messung automatisch auf Plausibilität der gemessenen Ergebnisse überprüft. Die Plausibilitätsprüfung der Messdaten beinhaltet eine Statusüberprüfung der Lenksysteme, eine Ausfallerkennung der Messsignale und eine Validierung der Daten durch Korrelation zwischen redundant gemessenen Größen. Das Lenkradmoment wurde nur durch das Messlenkrad direkt gemessen. Die Validierung des Messsignals erfolgt durch ein Modell, dass aus dem Motorstrom der Überlagerungslenkung, des Lenkzylinderdrucks und der Querschleunigung das Lenkradmoment schätzt. Die durch die Messtechnik gemessenen Größen sind im Anhang (Kapitel 10.3, Tabelle 10.2) im Vergleich zur Fahrzeugsensorik angegeben. Für die Fahrzeugsensorik ist lediglich die Angabe der Digitalisierung möglich, die sich von der Messgenauigkeit der Sensorik unterscheiden.

150 Echtzeitsystem für Funktionsprototyping (Micro-Autobox) der dSPACE GmbH, Paderborn

151 Die Beschleunigungen des Inertial-Messsystems werden durch fahrzeugfeste Beschleunigungssensoren (im Gegensatz zu kardänisch gelagerten Beschleunigungssensoren) erfasst.

152 Die Kopplung der Trägheitsnavigation mit Odometrie und Satellitennavigation ermöglicht eine höhere Genauigkeit über längere Zeiträume.

Das Fahrzeuggesamtgewicht beträgt 1742 kg und ist mit Reifen der Dimension 215/50 R 17 (Goodyear Eagle NCT5¹⁵³) ausgestattet. Das Fahrzeug hat keine verstellbaren Dämpfer (CDC) und verfügt auch sonst über keine aktiven Fahrwerkelemente.

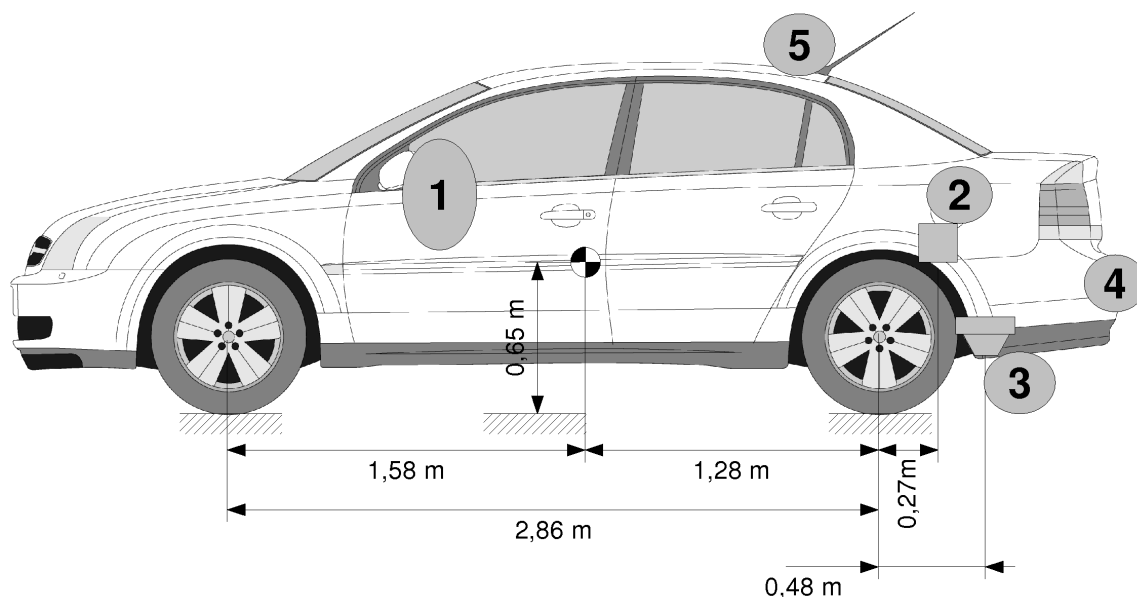


Abbildung 5.6: Versuchsfahrzeug mit Messtechnik und Lage des Schwerpunkts. Nr.1 Messlenkrad, Nr.2 Strap-Down Plattform, Nr.3 korrelationsoptischer Geschwindigkeitsmesser, Nr.4 Lichtschranke, Nr.5 GPS-Antenne.

Die variable Lenkübersetzung an der Vorderachse wird durch eine hydraulische Lenkunterstützung mit Überlagerungsgetriebe der Firma Continental Automotive ermöglicht (siehe Abbildung 5.7).¹⁵⁴ Mit diesem System können die Radlenkwinkel über den kompletten Lenkbereich fahrerunabhängig beeinflusst werden. Der (theoretische) Verstellbereich beträgt mehr als $\pm 80^\circ$ Radlenkwinkel. Er wird aus Gründen der Beherrschbarkeit im Fehlerfall auf $\pm 4^\circ$ Radwinkel begrenzt. Die Verstellgeschwindigkeit ist auf 26 $^\circ/\text{s}$ Radlenkwinkel limitiert und erreicht mit der Standard-Lenkübersetzung von 15,2:1 die zur Erfüllung der Norm notwendige Drehgeschwindigkeit des Lenkrads von mindestens 200 $^\circ/\text{s}$.¹⁵⁵ Aus Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9 kann die Eignung des Systems sowohl für die Versuche der Systemauslegung als auch der Systemstörung entnommen werden.

In Abbildung 5.8 ist der zeitliche Verlauf des Soll-Ritzelwinkels, des Ist-Ritzelwinkels und des Lenkradwinkels während eines Lenkwinkelsprungs von $1,6^\circ$ Radlenkwinkel bei fixiertem Lenkrad bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h dargestellt. Die Soll- und Ist-Ritzelwinkel sind in dieser Darstellung bereits in einen nominellen¹⁵⁶ Radlenkwinkel umgerechnet. Aus dem Zeitverlauf geht hervor, dass der Ist-Ritzelwinkel rund 40 ms dem Soll-Ritzelwinkel

¹⁵³ Um Abweichungen des Fahrzeugverhaltens aufgrund abweichender Reifeneigenschaften zu minimieren werden Reifen derselben Charge (vom Fahrzeughersteller) bezogen.

¹⁵⁴ http://www.conti-online.com/generator/www/us/en/continentalteves/continentalteves/general/home/hidden/esp_ll_1003_de.html, letzter Zugriff 23.5.2010

¹⁵⁵ Norm ISO 7401 (2003): Road vehicles Lateral transient response test methods Open-loop test methods

¹⁵⁶ Der nominelle Radlenkwinkel wird aus der Lenkgetriebeübersetzung in Geradeausfahrt und dem Ritzelwinkel (Lenkgetriebeeingang) bestimmt.

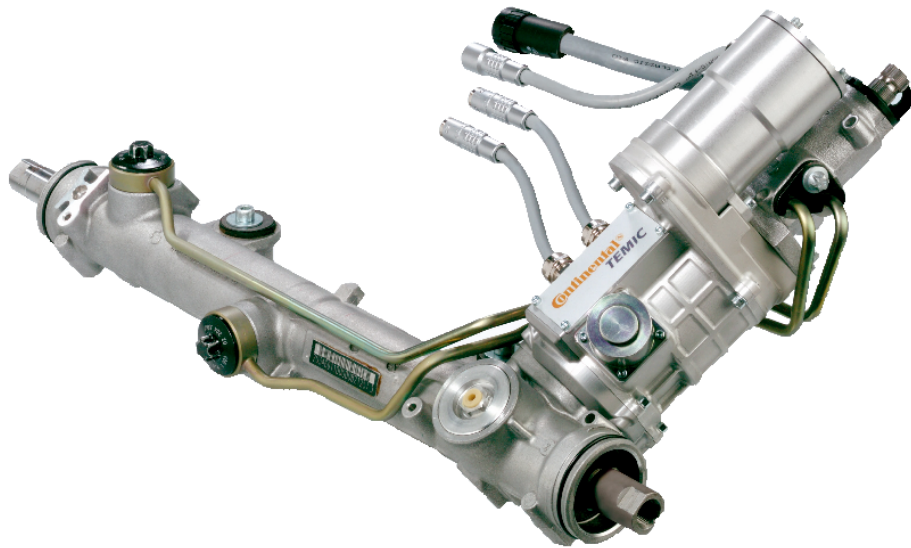


Abbildung 5.7: Überlagerungslenkung ESAS der Vorderachse. (Quelle: Continental, 2003)

nacheilt. Der vorgegebene Ritzelwinkel wird nicht überschritten. Stationär bleibt der Ist-Ritzelwinkel um $0,1^\circ$ Radlenkwinkel kleiner als der Soll-Ritzelwinkel. Die stationäre Winkeldifferenz des Ist-Ritzelwinkels kann auf die Elastizität der Fixierung des Lenkrads zurückgeführt werden.

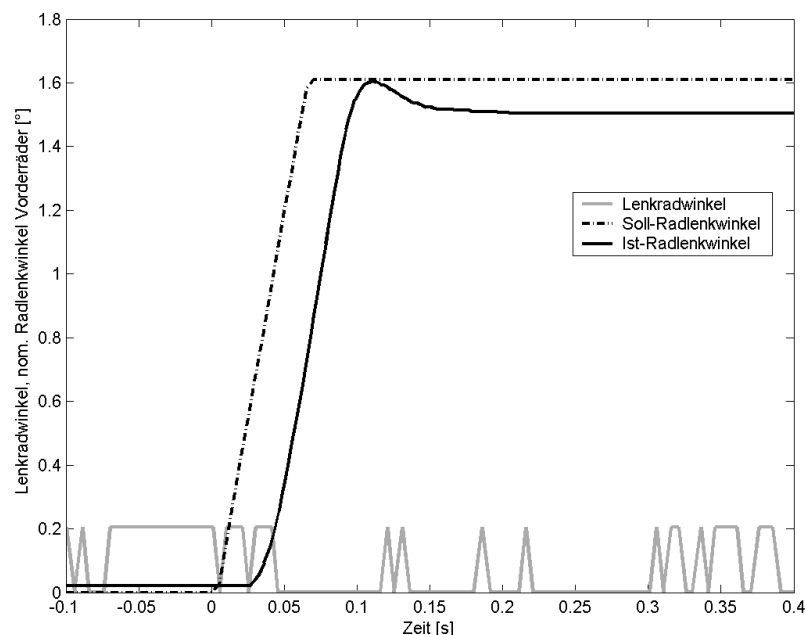


Abbildung 5.8: Zeitverlauf von Ist- und Soll-Ritzelwinkel (umgerechnet in Radlenkwinkel) sowie des Lenkradwinkels einer Störung an der Vorderachse bei 50 km/h und fixiertem Lenkrad.

Die Eignung der Überlagerungslenkung für die Versuche der Systemauslegung geht aus Abbildung 5.9 hervor. Die dargestellte Übertragungsfunktion von Soll- zu Ist-Ritzelwinkel wird durch einen Sinus-Sweep Versuch bei 50 km/h und einer Lenkfrequenz von 0,3 Hz bis zu

1,5 Hz und einer Ritzelwinkelamplitude von 20° ermittelt. Das Amplitudenspektrum zeigt einen Abfall der Ausgangsamplitude auf bis 75 % des Stationärwertes. Bei der in der Untersuchung verwendeten Lenkfrequenz von 0,36 Hz beträgt der Ausgangspegel noch 88 % des stationären Ausgangspegels. Aus dem Phasengang kann eine Steigung der Phase über der Frequenz von rund $-12^\circ/\text{Hz}$ abgeschätzt werden, was einer Gruppenlaufzeit von 21 ms entspricht. Die in Abbildung 5.8 aufgezeigte Latenzzeit von 40 ms kann damit nur teilweise erklärt werden. Eine vollständige Erklärung der Latenzzeit bei der Störwinkelumschaltung kann nicht gegeben werden, da keine Informationen zum internen Aufbau der Überlagerungslenkung vorliegen.

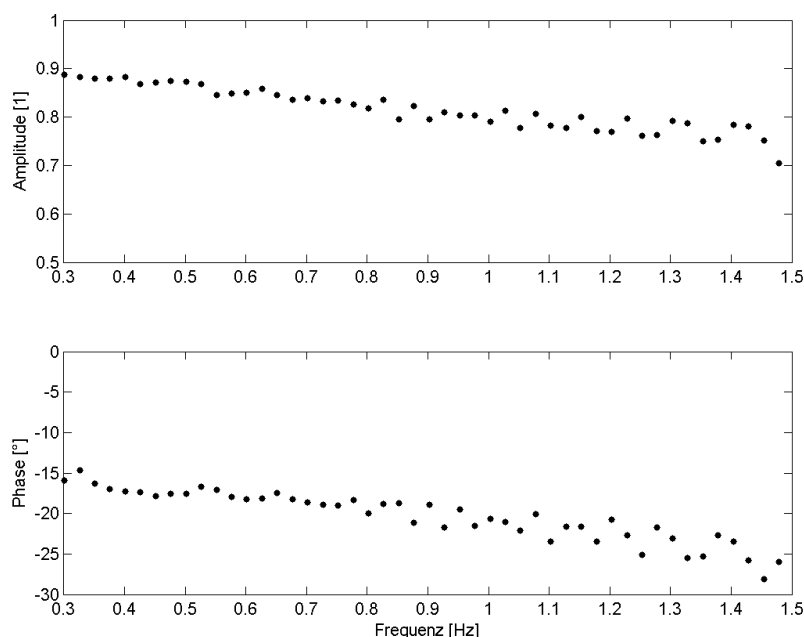


Abbildung 5.9: Frequenzgang von Ist-Ritzelwinkel und Soll-Ritzelwinkel der Überlagerungslenkung gemessen bei 50 km/h und fixiertem Lenkrad (Ritzelwinkelamplitude 20°).

Die Anlenkung der Hinterachse wird durch zwei Spurstangen-Aktoren sichergestellt. Die Aktoren werden anstatt der starren Spurstangen in der Hinterachse eingesetzt (Abbildung 5.10).¹⁵⁷ Durch Längenänderung können sie den Spurwinkel der Hinterräder im Rahmen der Verstellmöglichkeit der Achse verändern. In dem Versuchsfahrzeug können die Hinterräder um $\pm 1,7^\circ$ verstellt werden. Die Verstellgeschwindigkeit beträgt auch für dieses System 26 %/s (Radlenkwinkel).

Für die im Feldversuch bei 50 km/h ermittelte Rampenantwort zeigt Abbildung 5.11 den Zeitverlauf des Soll- und des Ist-Lenk winkels des rechten Hinterradaktors. Der Soll-Lenk winkel hat, wie in allen Versuchen auch, eine Lenkwinkelgeschwindigkeit von 26 %/s. Der Aktor setzt den Stellbefehl mit einer Verstellgeschwindigkeit von 20 %/s bis zum Erreichen

¹⁵⁷ http://mediacenter.conti-online.com/internet/generator/MAM/index,templateId=Folder_2FrenderDefaultSearchEngine.jsp.html?method=show&action=/searchengineDetails.do&oid=3593916&doctype=M_Image, letzter Zugriff 13. 5. 2008

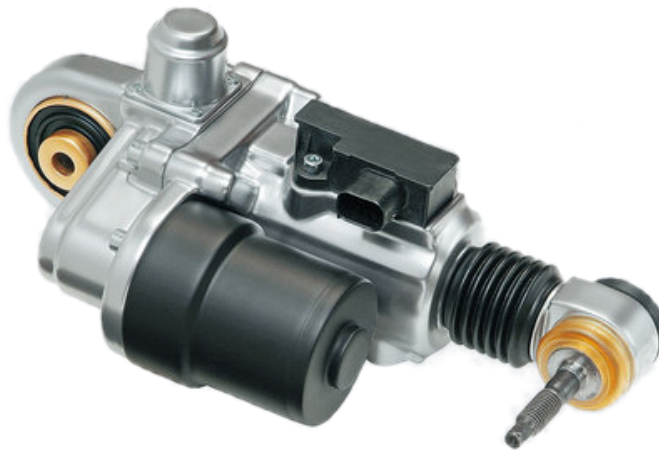


Abbildung 5.10: Spurstangenaktor der Hinterachslenkung.
(Quelle: Continental, 2003)

von rund 95 % des Endwertes um. Bei Erreichen von 95 % des Endwertes nähert sich der Aktor mit einer kleineren Verstellgeschwindigkeit von nur 0,8 %/s dem Sollwert an. Der Ist-Lenkswinkel hat nach rund 250 ms den Sollwert erreicht. Die Änderung der Verstellgeschwindigkeit auf einen deutlich kleineren Wert stellt sicher, dass das Fahrwerk bei derartigen Verstellvorgängen mit maximaler Amplitude nicht beschädigt wird. Eine bleibende Abweichung zwischen Soll- und Ist-Lenkswinkel fehlt und ist in der deutlich steiferen Abstützung des Aktors am Fahrzeugaufbau begründet (vgl. Abbildung 5.8).

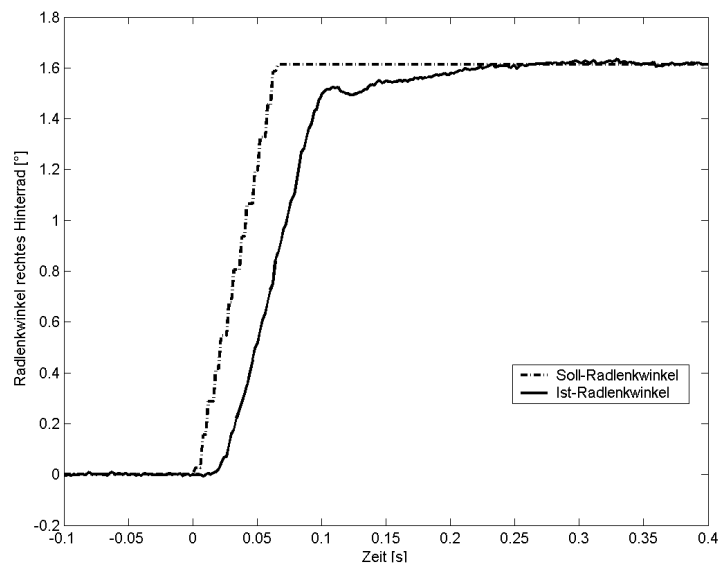


Abbildung 5.11: Soll- und Ist-Lenkswinkel des rechten Hinterrades bei 50 km/h.

Das Übertragungsverhalten des Aktors ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Auch die dargestellte Messung wurde unter normaler Belastung bei 50 km/h durchgeführt. Das Amplitudenspektrum aus Ist- zu Soll-Lenkswinkel zeigt bis zu 2,5 Hz einen konstanten Verlauf und für höhere Frequenzen einen 1/f-Abfall. Die Phase verliert bis zur Eckfrequenz rund 10°, um dann mit 33 °/Hz zu fallen. Die entstehende Phase kann auf die begrenzte Leistung des Aktors

zurückgeführt werden, da ein Phasenabfall durch die limitierte Verstellgeschwindigkeit von $26^\circ/\text{s}$ erst bei einer Frequenz von 16 Hz einsetzt. Aus einer Steigung des Phasengangs bis 2,5 Hz kann eine Gruppenlaufzeit von rund 11 ms ermittelt werden, was in diesem Fall der Latenzzeit aus Abbildung 5.11 nicht widerspricht. Die Erwartungshaltung, dass aus der Gruppenlaufzeit bis 2,5 Hz die Latenzzeit ermittelt werden kann, wird mit diesen Ergebnissen nicht befriedigt. Aufgrund der konstanten Ergebnisse bis 2,5 Hz kann erwartet werden, dass die Stellanforderungen durch das hintere Lenksystem mit vergleichbarer Latenzzeit zum vorderen Lenksystem umgesetzt werden.

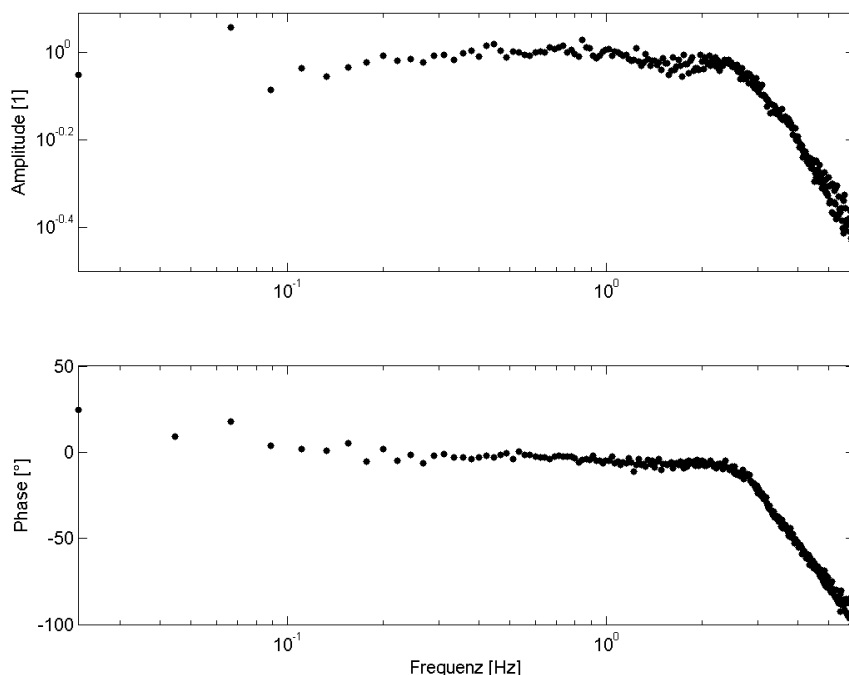


Abbildung 5.12: Frequenzgang von Soll- und Ist-Lenkwinkel des rechten Hinterrades bei 50 km/h bei einer Aussteueramplitude von $1,6^\circ$.

5.5.1 Fazit Untersuchungswerkzeug

Die Untersuchung der unterschiedlichen Systemauslegungen wird mit einem Fahrzeug durchgeführt, das mit zwei aktiven Lenksystemen an Vorder- und Hinterachse ausgestattet ist, die die Anforderungen zur Umsetzung unterschiedlicher Phasendifferenzen in Makrosinus- und Spurwechselversuchen erfüllen. Die Beherrschbarkeit einer Systemstörung eines der beiden Systeme kann mit den Aktoren auch im Versuch abgebildet werden. Die im Fahrzeug installierte Messtechnik erlaubt eine sichere und redundante Erfassung der für die Auswertung notwendigen Bewegungsgrößen.

6 Ergebnisse zur Systemauslegung

Der Nachweis eines kausalen Zusammenhangs zwischen der Phasendifferenz der Querbeschleunigung und der Gierrate bei einer konstanten Geschwindigkeit im Makrosinus- und Spurwechselversuch erfolgt einerseits auf Basis der gemessenen Zeitsignale der Querbeschleunigung und der Gierrate und andererseits durch die von den Fahrern bewerteten Dynamikunterschiede. Die Gegenüberstellung von objektiven und subjektiven Daten liefert die Grundlage zur Falsifikation oder Bewährung der Hypothese zur Sensitivität der Fahrer bezüglich der Phasendifferenz und einer Reduktion der Beanspruchung aufgrund der veränderten Fahrzeugreaktion durch die Hinterachslenkung.

6.1 Methodik der Auswertung

Die Auswertung der Versuche zur Systemauslegung erfolgt in zwei Schritten: Im ersten Schritt werden die Fahrerbewertungen ausgewertet und im zweiten Schritt wird die Phasendifferenz analysiert. Daran schließt sich eine Gegenüberstellung und Bewertung der Fahrerbewertung und Phasendifferenz an.

Alle zur Auswertung genutzten Versuchsfahrten werden von den Fahrern fehlerfrei durchgeführt. Für Versuche des Makrosinus bedeutet dies, dass alle Pylonen umfahren und die Ein- und Ausfahrtsgassen des Parcours von den Fahrern durchfahren wurden. Für die Versuche des Spurwechsels bedeutet dies, dass die Toleranz der Ein- und Ausfahrtsgassen nicht überschritten wurde. Die Geschwindigkeiten für beide Versuche liegen zwischen 74 km/h und 80 km/h.

6.1.1 Auswertemethode der Fahrerbewertung

Die Bewertungen der Fahrer zwischen den zwei in einem Versuch dargestellten Systemauslegungen des Fahrzeugs werden mithilfe des Fragebogens erhoben (siehe Kapitel 5.3). Die Bewertung der Varianten erfolgt relativ. Auf der siebenstufigen bipolaren Skala können jeweils drei Abstufungen zur Gewichtung eines Merkmals gewählt werden. Die Gewichtung ist ordinal skaliert. Die neutrale Einschätzung berücksichtigt die Indifferenz oder Gleichheit der zwei durch den Fahrer zu bewertenden Systemauslegungen. Ziel der Auswertung ist ein statistischer Nachweis des kausalen Zusammenhangs zwischen den im Versuch dargestellten Unterschieden der Systemauslegung des Fahrzeugs (Kombination der Systemauslegung) und der erhobenen Fahrerbewertung.

6.1.1.1 Varianzanalyse

Zur Falsifikation der Hypothesen (siehe Kapitel 4.4) ist eine einfaktorielle Varianzanalyse geeignet, die anhand signifikant unterschiedlicher Mittelwerte der Fahrerbewertung (abhängige Variable) einen Einfluss der Kombination der Systemauslegung (unabhängige Variable) nachweist. Die der Varianzanalyse zugrunde liegende Nullhypothese postuliert keine unterschiedliche Bewertungen bei Veränderung der im Test dargestellten Kombinationen der

Systemauslegungen. Kann aufgrund der Ergebnisse die Nullhypothese verworfen werden, ist zu prüfen, welche der Bewertungen unterschiedlich sind. Die Varianzanalyse zeigt nur auf, dass eine oder mehrere Kombinationen der Systemauslegungen von den Fahrern unterschiedlich bewertet werden.

Bei der Durchführung der Varianzanalyse ist zu berücksichtigen, dass die Bewertungen der Fahrer auf einer ordinalen Skala vorgenommen wurden. Daher können zur Hypothesenprüfung nur parameterfreie Verfahren herangezogen werden. Es wird daher eine Erweiterung der Varianzanalyse eingesetzt, die zum Testen der Hypothese den Kruskal-Wallis-Test verwendet, der an keine spezifische Verteilung der abhängigen Variablen (Fahrerurteile) gebunden ist.

6.1.1.2 Funktionsweise Varianzanalyse

Ausgehend von dem Gesamtstichprobenumfang N der zehn unterschiedlichen Kombinationen der Systemauslegungen (p), wird jeder Fahrerbewertung ein Rang zugeordnet. Beim Vorliegen von gleichen Fahrerbewertungen wird jeder der Bewertungen ein mittlerer Rang zugewiesen. Der Kruskal-Wallis Test prüft, ob die Mittelwerte der miteinander zu vergleichenden Kombinationen signifikant (zum Signifikanzniveau α) verschieden sind. Aus den zuvor bestimmten Rängen der Fahrerbewertungen wird für jede der p Kombinationen ein mittlerer Rang r_i der Fahrerbewertungen bestimmt und zu einer Prüfgröße H_{emp} verrechnet (Gleichung 6.1).¹⁵⁸ Die Korrekturgröße B (Gleichung 6.2) berücksichtigt in der Prüfgröße H_{emp} die Bindungen durch identische Fahrerbewertungen.

$$H_{emp} = \frac{1}{B} \left[\frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^p \frac{1}{n_i} r_i^2 - 3N(N+1) \right] \quad (\text{Gl. 6.1})$$

$$B = 1 - \frac{1}{N^3 - N} \sum_{l=1}^g (t_l^3 - t_l) \quad (\text{Gl. 6.2})$$

Die nach Gleichung 6.1 bestimmte Prüfgröße des Kruskal-Wallis Tests wird mit dem Wert der χ^2 -Verteilung mit dem Freiheitsgrad $p-1$ verglichen, der die Fläche von $1-\alpha$ abschneidet. Ist die Prüfgröße H_{emp} größer oder gleich als der Wert der χ^2 -Verteilung, wird die Nullhypothese der Varianzanalyse zum Niveau von α zurückgewiesen. Bei diesem Ergebnis kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von α davon ausgegangen werden, dass mindestens eine der untersuchten Kombinationen von den Fahrern im Versuch unterschiedlich bewertet wird.

Die einfaktorielle Varianzanalyse kann den Einfluss einer unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable nachweisen. In der abhängigen Variablen könnten aber weitere, durch den Versuch nicht kontrollierte Variable (Störgrößen), abgebildet sein. Um den Einfluss der geänderten Systemkonfigurationen auf die Fahrerbewertung von dem Einfluss der Störgrößen aufzuzeigen, kann aus dem Verhältnis der Quadratsumme der Kombinationen und der Gesamtquadratsumme eine Varianzaufklärung bestimmt werden (Gleichung 6.3), die ein de-

¹⁵⁸ Hartung et al. (1995): Statistik, S. 613f

skriptives Maß für den Einfluss der geänderten Systemkonfiguration auf die Fahrerbewertung darstellt. Aus einer geringen Varianzaufklärung kann ein großer Einfluss durch den Versuch nicht kontrollierter Variablen entnommen werden. Dies ist gleichbedeutend mit einem geringen Einfluss der geänderten Systemauslegung auf die Fahrerbewertung.

$$\eta^2 = \frac{QS_{Kombination}}{QS_{Total}} \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 6.3})$$

Die zur Berechnung notwendige Quadratsumme der Kombinationen berücksichtigt die quadratischen Abweichungen zwischen dem durchschnittlichen Urteil einer Variantenkombination und dem Durchschnitt aller Urteile (Gleichung 6.4 und 6.5).

$$QS_{Kombination} = \sum_{i=1}^p n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (\text{Gl. 6.4})$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij} \quad (\text{Gl. 6.5})$$

Durch Bezug auf die durchschnittlichen Urteile einer Variantenkombination werden somit nur die Anteile erfasst, die durch die Veränderung der unabhängigen Variablen hervorgerufen werden. Dieser Anteil wird durch die quadratischen Abweichungen aller Fahrerbewertungen zum Durchschnittsurteil (siehe Gleichung 6.6) auf die gesamte Stichprobe bezogen.

$$QS_{Total} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y})^2 \quad (\text{Gl. 6.6})$$

Bei der Interpretation der Varianzaufklärung muss berücksichtigt werden, dass durch diese einfache Berechnung die wahre Varianzaufklärung der Gesamtpopulation überschätzt wird.¹⁵⁹

6.1.1.3 Reihenfolgeeffekt

Kann für die Fahrerbewertungen bezüglich einer Frage gezeigt werden, dass kein sequenzieller Einfluss der Kombination auf die Bewertungen vorliegt (Einfluss der Reihenfolge), können die Fahrerbewertungen einer Systemauslegungskombination zusammengefasst werden und damit die Anzahl der Stichproben pro Variantenkombination erhöht werden. Mit der Erhöhung der Stichprobenanzahl steigt auch die Trennschärfe des eingesetzten Tests. Das Fehlen einer Abhängigkeit von der untersuchten Kombinationsreihenfolge muss für jede Systemauslegungskombination und für jede Frage einzeln nachgewiesen werden. Auch hier muss aufgrund der eingesetzten ordinalen Skala der Fahrerbewertungen der Nachweis mit einem parameterfreien Testverfahren erfolgen.

Für den Vergleich zweier unabhängiger ordinalskalierten Messreihen ist der Kolmogorow-Smirnow-Test geeignet, da der Test speziell für die Identifikation von Abweichungen zwischen zwei zu vergleichenden empirischen Verteilungsfunktionen konstruiert ist.¹⁶⁰ Der

¹⁵⁹ Bortz (2005): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 255

¹⁶⁰ Hartung et al. (1995): Statistik, S. 526

Test ist mit unterschiedlichen statistischen Hypothesen ausführbar. Hier wird der Test derart eingesetzt, dass bei erfolgreicher Alternativhypothese von einer ungleichen Verteilung der beiden Urteilsvarianten ausgegangen werden kann. Wird aufgrund des Testergebnisses die Nullhypothese beibehalten, ist die Gleichheit der beiden zu untersuchenden Stichproben statistisch zwar nicht gezeigt, aber eine Ungleichheit der beiden empirischen Verteilungsfunktionen kann mit den vorliegenden Verteilungen nicht behauptet werden. Der sichere statistische Beleg für eine Gleichheit der beiden empirischen Verteilungsfunktionen ist nur mit einer spezifischen Hypothese zu erbringen, die aber die Angabe eines Mindestunterschieds zwischen den beiden zu untersuchenden Verteilungen voraussetzt. Diese dazu notwendigen Untersuchungsergebnisse können erst nach der Untersuchung erbracht werden.

Zeigt das Testergebnis zum gewählten Signifikanzniveau α , dass die beiden empirischen Verteilungsfunktionen unterschiedlich sind, können die Bewertungen der zwei Kombinationspaare für die Untersuchung nicht zusammengefasst werden.

6.1.1.4 Funktionsweise Kolmogorow-Smirnow-Test

Aus den Stichprobenumfängen und der maximalen Differenzen der beiden Verteilungsdichtefunktionen der zu prüfenden Stichproben wird durch Näherung der Kolmogorow-Smirnow Verteilung ein Testwert K bestimmt (Gleichungen 6.7 und 6.8). Ist der Testwert K größer als das gewählte Signifikanzniveau α wird die Nullhypothese beibehalten. Die beiden Bewertungsverteilungen können nicht sicher unterschieden werden. Ist der Testwert kleiner oder gleich dem Signifikanzniveau, kann der Unterschied zwischen den beiden empirischen Verteilungsdichtefunktionen nicht mehr aus der Streuung der Fahrerbewertungen erklärt werden. Die Alternativhypothese (unterschiedliche Bewertung) wird stattdessen angenommen.

$$K = 2 \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^{i-1} e^{-2\lambda^2 i^2} \quad (\text{Gl. 6.7})$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} + 0,12 + \frac{0,11}{\sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}}} \cdot \max(|S_{K12}(x) - S_{K21}(x)|) \quad , \quad \lambda \in \mathbb{R}^{0+} \quad (\text{Gl. 6.8})$$

Bei der Interpretation der Testwerte des Kolmogorow-Smirnow-Tests in den folgenden Kapiteln muss beachtet werden, dass der Auswertalgorithmus die Testwerte auf den Wahrscheinlichkeitsbereich $[0,1]$ limitiert, weshalb Wahrscheinlichkeiten von exakt 1 oder exakt 0 auftreten können. Werte außerhalb des Bereichs $[0,1]$ werden durch die Approximation verursacht und müssen für eine sinnvolle Interpretation auf das Intervall $[0,1]$ eingeschränkt werden.

Die Verwendung anderer parameterfreier Tests, wie des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests, kann zur Überprüfung einer gleichen Verteilungsfunktion nicht eingesetzt werden, da die Testvoraussetzung einer gleichen Stichprobenanzahl der zu überprüfenden Kombinationen in nicht allen Fällen erfüllt ist. Unter Verlust von Messungen könnte jedoch eine gleiche Anzahl

von Stichproben erreicht werden, die aber in dieser Untersuchung keine anderen Aussagen zu den Reihenfolgeeffekten im Makrosinus- und Spurwechselversuch stützen.

6.1.1.5 Signifikanzniveau der Fahrerbewertungen

Aufgrund der zugrunde liegenden unspezifischen Unterschiedshypothesen kann ein β -Fehler¹⁶¹ nicht aus den erhobenen Bewertungen bestimmt werden.¹⁶² Durch den unmittelbaren Zusammenhang von α - und β -Fehler vermindert sich der β -Fehler mit zunehmendem α -Fehlerniveau um $1-\alpha$. Die Hypothesenprüfung der Fahrerbewertungen wird daher auf einem Signifikanzniveau von 5 % durchgeführt, um so den β -Fehler dennoch zu beeinflussen, obwohl er durch die Wahl der Hypothesen anhand statistischer Prüfung nicht bestimmt werden kann. Zur Ermittlung des β -Fehlers müssten spezifische Unterschiedshypothesen aufgestellt werden, die aber aus mangelnder Kenntnis der Fahrersensitivität bezüglich der Phasendifferenzen nicht aufgestellt werden können.

6.1.2 Auswertmethode der objektiven Daten

Der Nachweis eines kausalen Zusammenhangs zwischen der geänderten Systemauslegung und der Fahrerbewertung erfordert einen Nachweis über die tatsächliche Änderung der Systemantwort im Fahrversuch. Ohne diesen objektiven Nachweis ist eine Falsifikation oder Bewährung der aufgestellten Hypothesen nicht möglich, da nicht eindeutig ist, ob eine geringe Sensitivität der Fahrer vorliegt oder eine zu geringe Änderung des Systemverhaltens stattgefunden hat. Eine Änderung der Systemantwort wird auf Basis der Zeitsignale des Lenkradwinkels (als Eingang des Systems) und der Querbeschleunigung und Gierrate (als Systemausgänge) ermittelt.

Der statistische Nachweis einer veränderten Fahrzeugantwort auf die Fahrereingaben ist für eine Kombination von zwei Systemauslegungen erbracht, wenn die Zeitverzögerungen von Gierrate zu Lenkradwinkel und Querbeschleunigung zu Lenkradwinkel signifikant unterschiedlich sind. Die statistische Auswertung erfolgt hier konservativ zu einem Signifikanzniveau von 1 % durch Verwendung des Wilcoxon-Rangsummen Tests. Dieser Test wird gewählt, da eine Normalverteilung der zu messenden Zeitverzögerungen durch das interindividuelle Lenkverhalten der Fahrer nicht vorausgesetzt werden kann.

Der Wilcoxon-Rangsummen-Test nimmt als Nullhypothese an, dass kein Unterschied zwischen den Stichproben zweier Varianten einer Kombination besteht. Damit die Nullhypothese des zweiseitigen Vergleichstests zurückgewiesen werden kann, muss der empirisch ermittelte z-Wert kleiner als der z-Wert des jeweiligen α -Niveaus sein. Zur sicheren Unterscheidung der Fahrdynamikdaten werden die Unterschiedshypothesen auf einem Signifikanzniveau von 1 % getestet. Der empirische z-Wert muss dazu außerhalb des Bereichs $\pm 2,57$ liegen. Wird für einen Vergleich zweier Stichproben der Bereich des kritischen z-

¹⁶¹ Mit einem β -Fehler wird die bedingte Wahrscheinlichkeit angegeben, die Nullhypothese beizubehalten, obwohl in der Grundgesamtheit die Alternativhypothese gilt.

¹⁶² Bortz, Weber (2005): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 121

Wertes nicht verlassen, kann die Nullhypothese auf dem gesetzten Signifikanzniveau nicht zurückgewiesen werden. Die Verteilungen der Stichproben müssen für diesen Fall als nicht verschieden angesehen werden. Eine Änderung der Systemauslegung wäre für diesen Fall statistisch nicht nachweisbar.

Sinkt die Stichprobengröße unter 26 Messungen, wird auf tabellierten Kennwerten¹⁶³ zur Hypothesenprüfung zurückgegriffen. Durch die Verwendung der Tabellenwerte wird die zunehmende Differenz zur Normalverteilung bei kleinerer Stichprobengröße berücksichtigt.

6.1.2.1 Objektive Fahrzeugreaktion im Makrosinusversuch

In Versuchen des Makrosinus wird aus dem eingeschwungenen Signal des Lenkradwinkels an der Stelle der maximalen Leistungsdichte eine Grundfrequenz ω_G des Lenkradwinkelsignals ermittelt, die sich aus dem Pylonenabstand des Versuchsaufbaus und der Fahrgeschwindigkeit ableitet. Mithilfe der Phasenwinkel von Querschleunigung zu Lenkradwinkel φ_{ay} und Gierrate zu Lenkradwinkel φ_ψ können aus den Phasengängen an der Stelle der Grundfrequenz die Zeitverzögerungen zum Lenkradwinkel bestimmt werden. Aus der Phasendifferenz von Querschleunigung und der Gierrate wird der Phasenverzug $\Delta\tau$ bestimmt (siehe Gleichung 6.9).

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\varphi}{\omega_G} = \frac{\varphi_{ay} - \varphi_\psi}{\omega_G} \quad (\text{Gl. 6.9})$$

Die Ermittlung der Zeitverzögerungen über die Grundfrequenz (Maximum der Leistungsdichte) ist gegenüber der Differenzbildung der Zeitsignale robuster gegenüber kleinen Schwankungen der Amplitude (Skalierungs- oder Offsetfehler) oder Schwankungen der Lenkfrequenz.

6.1.2.2 Objektive Fahrzeugreaktion im Spurwechselversuch

In den Spurwechselversuchen kann die Ermittlung der Zeitverzögerungen durch die Grundfrequenz aufgrund einer zu geringen Schwingungsanzahl nicht angewandt werden. Der zeitliche Abstand der Fahrzeugbewegungsgrößen auf die Lenkeingabe wird in den Spurwechselversuchen durch Lage des Maximums der Kreuzkorrelation im Zeitbereich ermittelt. Zusammen mit der Abtastrate der Signale kann auf die zeitliche Verschiebung zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangssignal geschlossen werden. Das Eingangssignal ist in diesen Versuchen der Lenkradwinkel. Das Ausgangssignal ist die Querschleunigung oder die Gierrate.

6.2 Systemauslegungen im Makrosinusversuch

Die Hypothesen zur Fahrersensitivität auf die Phasendifferenz und der Hypothese zur Reduktion der Beanspruchung bei Verringerung der Phasendifferenz erfordern einen Falsifikationsversuch, der geeignet ist, die aufgestellten Hypothesen im Makrosinus- und Spurwechselversuch zu widerlegen.

¹⁶³ Clauß et al. (1972): Grundlagen der Statistik für Psychologen, Pädagogen und Soziologen, S. 349 nach Bortz, Weber (2005): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 829

Zur Verallgemeinerung der aus den Tests abzuleitenden Aussagen ist es hilfreich, einen Nachweis über den Einfluss der Versuchsreihenfolge auf die Fahrerbewertungen zu führen, um die Trennschärfe der eingesetzten statistischen Tests zu erhöhen. Zum Nachweis werden die Urteilsverteilungen von zwei Systemauslegungen in abweichender Darbietungsreihenfolge miteinander verglichen. Da ein sicherer Nachweis über die statistisch abweichende Verteilung notwendig ist, wird von der Alternativhypothese ausgegangen, dass die Verteilungen der Fahrerbewertungen zweier Systemauslegungen einer spezifischen Kombination sich unterscheiden und somit ein Einfluss der Reihenfolge vorliegt. Die dazu geeignete Nullhypothese postuliert, dass die Verteilungen der Fahrerbewertungen nicht unterschiedlich sind. Ein Einfluss der Reihenfolge der dargestellten Systemauslegungen auf die Bewertungen der Fahrer kann bei Bewährung der Nullhypothese nicht belegt werden.

Zur Erhöhung der Trennschärfe der folgenden statistischen Auswertungen ist hier ausreichend, einen signifikanten Unterschied der beiden Verteilungsdichten der Fahrerbewertungen zu belegen. Gelingt der Nachweis einer unterschiedlichen Verteilung zweier Systemauslegungen in Abhängigkeit ihrer Versuchsreihenfolge zum Signifikanzniveau α nicht, kann für die weitere Analyse des Makrosinusversuchs auf eine getrennte Darstellung der Reihenfolge verzichtet werden.

6.2.1 Abhängigkeit der Fahrerbewertungen von der Versuchsreihenfolge

Die Fahrerbewertungen aus den Makrosinusversuchen werden auf Vorliegen eines sequenziellen Einflusses der den Fahrern dargebotenen Versuchsreihenfolge für jede Frage aus dem Makrosinusversuch untersucht (siehe Tabelle 6.1¹⁶⁴).

Die Daten der Tabelle zeigen getrennt für die Fragen der Schnelligkeit, Direktheit und Beanspruchung den Testwert K des Unterschied-Tests, die für ein Signifikanzniveau von 5 % akzeptierte Hypothese und der größte Abstand der Verteilungsdichtefunktionen der Bewertungen. Links in Tabelle 6.1 sind die Versuchskombinationen K_{ij} und K_{ji} der Systemauslegungen sowie die Anzahl der gültigen Versuche n_{ij} und n_{ji} angegeben.

¹⁶⁴ Die Spalten K_{ij} und K_{ji} der Tabelle 6.1 geben die Kombinationen der Systemauslegungen an, deren Bewertungen auf eine unterschiedliche Verteilung getestet werden. Die Spalten n_{ij} und n_{ji} dokumentieren die Stichprobengröße der jeweiligen Verteilung. Die Stichprobengröße ist für alle Fragestellungen gleich. Abweichungen der Stichprobengröße ergeben sich aus fehlerhaften Versuchsvoraussetzungen, die nicht überwacht werden konnten und so zu einem nachträglichen Ausschluss von Versuchen führen. Akzeptiert gibt die anhand des Testwerts und des gewählten Signifikanzniveaus akzeptierte Hypothese an. Der K -Wert entspricht dem Testwert des Kolmogorow-Smirnow Tests. Die Größe $\max(|N_i - N_j|)$ gibt den größten Unterschied der zu testenden Verteilungen wieder. Die Größe geht unmittelbar in die Testgröße K ein.

Tabelle 6.1: Test der Versuchsreihenfolge auf die Bewertung bezüglich der Fragen der Direktheit, der Schnelligkeit und der Beanspruchung bei 80 km/h im Makrosinusversuch (Signifikanzniveau 5 %).

K_{ij}	K_{ji}	n_{ij}	n_{ji}	Schnelligkeit			Direktheit			Beanspruchung		
				H_{akzept}	K	$max(N_i - N_j)$	H_{akzept}	K	$max(N_i - N_j)$	H_{akzept}	K	$max(N_i - N_j)$
0-1	1-0	16	17	H_0	1,000	0,092	H_0	0,992	0,143	H_0	0,992	0,143
0-2	2-0	16	14	H_0	1,000	0,107	H_0	0,903	0,196	H_0	0,999	0,125
0-3	3-0	18	14	H_0	0,848	0,206	H_0	0,997	0,135	H_0	1,000	0,111
0-4	4-0	16	15	H_0	0,954	0,175	H_0	0,847	0,208	H_0	1,000	0,108
1-2	2-1	15	15	H_0	0,589	0,267	H_0	0,890	0,200	H_0	0,308	0,333
1-3	3-1	15	14	H_0	0,632	0,262	H_0	0,632	0,262	H_0	0,610	0,267
1-4	4-1	19	13	H_0	0,662	0,246	H_0	0,994	0,143	H_0	0,309	0,325
2-3	3-2	14	18	H_0	0,510	0,279	H_0	0,793	0,221	H_0	1,000	0,100
2-4	4-2	15	16	H_0	1,000	0,114	H_0	0,689	0,239	H_0	0,571	0,263
3-4	4-3	16	15	H_0	0,970	0,167	H_0	0,879	0,200	H_0	0,549	0,271

Für die Fragen der Direktheit und der Schnelligkeit unterschreiten die Testwerte das gewählte Signifikanzniveau von 5 % nicht. Eine Unabhängigkeit der Fahrerbewertung von der Versuchsreihenfolge kann für diese Fragen nicht verworfen werden.¹⁶⁵ Die Testwerte K zeigen, dass die empirischen Verteilungen der Fahrerbewertung zweier Systemauslegungen, auch bei noch größerem Signifikanzniveau (z. B. 10 %) die Annahme einer gleichen Verteilung nicht widersprechen.

Für die Frage nach der empfundenen Beanspruchung während der Versuchsdurchführung kann ebenfalls die Hypothese einer gleichen Bewertungsverteilung (siehe Tabelle 6.1) nicht verworfen werden. Auch für diese Bewertungen kann auch ein größeres Signifikanzniveau die Annahme einer unterschiedlichen Verteilung der Bewertungen der Beanspruchung belegen.

Zusammenfassend kann aufgrund des Vergleiches der empirischen Verteilungsfunktionen behauptet werden, dass für ein Signifikanzniveau von 5 % keine unterschiedliche Bewertungsverteilungen der Fahrer nachgewiesen werden können. Auch die Wahl der sonst in der Statistik allgemein anerkannten Signifikanzniveaus von 5 % oder 10 % können keine Kombination der Systemauslegungen identifizieren, die bezüglich einer Fragestellung als signifikant unterschiedlich bewertet werden.

Aufgrund der Ergebnisse wird auf eine gesonderte Betrachtung der Variantenkombinationen in den weiteren Ergebnissen verzichtet. In den folgenden Darstellungen werden die Kombinationen K_{ij} und K_{ji} (siehe Tabelle 6.1) zusammengefasst. Die bidirektionale Bewertungen der Fahrer werden entsprechend angepasst.

6.2.2 Fahrerbewertung im Makrosinusversuch

Die Analyse der Bewertungsunterschiede, die die Fahrer zur Bewertung der geänderten Systemauslegungen im Makrosinusversuch abgeben, wird mithilfe einer Varianzanalyse durchgeführt. Ziel dieser Analyse ist der Nachweis, dass die Fahrerbewertungen (abhängige Variable) bezüglich eines Merkmals (entspricht einer Frage des Fragebogens) von der Änderung der Systemauslegung (unabhängige Variable) abhängig ist. Eine Analyse mithilfe der Varianzanalyse bietet gegenüber mehrfachen Einzelprüfungen den statistischen Vorteil, dass eine wiederholte Anwendung eines Signifikanztests und damit eine Korrektur des Signifikanzniveaus entfällt.¹⁶⁶ Als objektives Maß für den Einfluss von Störgrößen wird die Varianzaufklärung herangezogen, die aufzeigt, wie groß der Einfluss von weiteren Größen auf die Fahrerbewertung ist, die im Versuchsdesign nicht erfasst sind. Wird durch die Varianzanalyse die Nullhypothese (kein Einfluss der Systemänderung auf die Fahrerbewertungen) verworfen und stattdessen die Alternativhypothese angenommen (mindestens eine Fahrerbewertung wird von der Systemauslegung beeinflusst), muss in weiteren Einzeluntersuchungen identifiziert werden, welche der Systemauslegung einen Einfluss auf die Fahrerbewertung hat.

¹⁶⁵ Zur Ablehnung der Nullhypothese (gleiche Bewertungsverteilung) muss der K -Wert des Tests kleiner als das gewählte Signifikanzniveau (hier 0,05) sein.

¹⁶⁶ Bortz, Weber (2005): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 250

In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der Varianzanalyse der beiden Parallelfragen des bewerteten Ansprechverhaltens des Fahrzeugs auf die Lenkeingabe der Fahrer im Makrosinusversuch dargestellt. Die obere Tabelle zeigt die Ergebnisse zur Schnelligkeit der Fahrzeugreaktion auf die Lenkeingabe. Die untere Tabelle listet die Ergebnisse zur Direktheit der Fahrzeugreaktion auf. In den Tabellen sind jeweils die Quadratsummen (QS), die Freiheitsgrade (FHG) und die Varianzen der Kombinationen der Systemauslegungen und der Fehler dargestellt. Weiter zeigen die Tabellen den aus der Varianzanalyse ermittelten Kennwert H_{emp} (siehe Gleichung 6.1, S.63), den Wert der χ^2 -Verteilung für ein Signifikanzniveau von 5 % und die aus der Varianzanalyse akzeptierte Hypothese.

Tabelle 6.2: Ergebnis der Varianzanalyse der Fahrerbewertungen über alle Kombinationen zur Schnelligkeit (oben) und zur Direktheit (unten) der Fahrzeugantwort auf die Lenkeingaben für ein Signifikanzniveau von 5 % im Makrosinusversuch.

Schnelligkeit	QS	FHG	$\hat{\sigma}^2$	H_{emp}	$\chi^2_{9;0,95}$	H_{akzept}
Kombinationen	49437	9	5493	6,4	16,92	H_0
Fehler	2342290	301	7782			
Total	2391728	310				

Direktheit	QS	FHG	$\hat{\sigma}^2$	H_{emp}	$\chi^2_{9;0,95}$	H_{akzept}
Kombinationen	31885	9	3543	4,12	16,92	H_0
Fehler	2368548	301	7869			
Total	2400433	310				

Die Ergebnisse der Fragen zur Schnelligkeit und der Direktheit der Fahrzeugantwort auf die Lenkeingaben zeigen, dass für ein Signifikanzniveau von 5 % ein Einfluss der Systemauslegung auf die von den Fahrern bewertete Fahrzeugreaktion nicht nachgewiesen werden kann. Es muss aufgrund dieser Ergebnisse weiter davon ausgegangen werden, dass die Gesamtheit der Probanden kein geändertes Ansprechverhalten identifizieren kann. Der Erklärungsbeitrag der Systemauslegung ist sehr klein, wie die Varianzaufklärung von 2,1 % (Berechnung siehe Gleichung 6.3, S.64) für die Frage der Schnelligkeit der Fahrzeugreaktion zeigt. Der Erklärungsbeitrag der Systemauslegung für die Frage zur Direktheit der Fahrzeugantwort ist mit 1,3 % nochmals geringer. Der Einfluss der Systemauslegung auf die Fahrerbewertungen kann

bei der ermittelten Varianz der Fahrerbewertungen vernachlässigt werden, wie die geringen Varianzaufklärungen belegen.¹⁶⁷

Für die von den Fahrern bewertete Beanspruchung während der Versuchsdurchführung werden ähnliche Ergebnisse ermittelt (Tabelle 6.3). Die bewertete Beanspruchungsänderung wird von der Systemauslegung vernachlässigbar beeinflusst, wie die akzeptierte Hypothese aufzeigt. Der Testwert der Varianzanalyse H_{emp} ist auch hier deutlich von der 5%-Signifikanzgrenze entfernt. Die Systemauslegung hat an diesem Ergebnis nur einen Erklärungsbeitrag von 3,5 %. Ob die von den Fahrern bewertete Beanspruchung während der Versuchsdurchführung von weiteren nicht kontrollierten Variablen abhängt oder ob das Ergebnis zufällig ist, kann aufgrund dieser Ergebnisse nicht ermittelt werden.

Tabelle 6.3: Ergebnis der Varianzanalyse der Fahrerbewertungen zur Beanspruchung für alle Kombinationen zu einem Signifikanzniveau von 5 % im Makrosinusversuch.

Beanspruchung	QS	FHG	$\hat{\sigma}^2$	H_{emp}	$\chi^2_{9;0.95}$	H_{akzept}
Kombinationen	83347	9	9261	10,7	16,92	H_0
Fehler	2331283	301	7745			
Total	2414630	310				

Zur Interpretation der Ergebnisse der Varianzanalysen muss der Nachweis erbracht werden, dass eine Änderung der Systemauslegungen im Versuch stattgefunden hat. Ohne den objektiven Nachweis der Änderung des Phasenverzugs können die durchgeführten Versuche nicht als Falsifizierungsversuch akzeptiert werden.

6.2.3 Validierung der Systemauslegung im Makrosinusversuch

Die Ergebnisse der statistischen Überprüfung der objektiven Daten der Fahrzeugantwort sind in den Tabellen 6.4 und 6.5 dargestellt. Die Tabellen zeigen die Veränderung des Zeitverzugs zwischen Lenkradwinkel und Querbeschleunigung (Tabelle 6.4) und zwischen Lenkradwinkel und Gierrate (Tabelle 6.5). Die Prüfung der beiden Bewegungsgrößen erfolgt getrennt, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Verteilungen der ermittelten Zeitverzüge für Querbeschleunigung und Gierrate unterschiedlich sind.

¹⁶⁷ Die Varianzaufklärung ist ein deskriptives Maß für die Ursache der in den Bewertungen enthaltenen Varianz. In dieser Auswertung kann die Varianz nicht auf die Änderung der Systemauslegung zurückgeführt werden, sondern kann nur auf die Unterschiedlichkeit der Bewertungen innerhalb der Systemauslegungen zurückgeführt werden.

Kombination (i-j)	n	n_{red}	z_{emp}	$z_{krit,0,99}$	H_{akzept}	$\overline{\tau_{ay,i}}$ [ms]	$\overline{\tau_{ay,j}}$ [ms]
0-1	28	28	-4,63	-2,58	H_1	-117	-91
0-2	26	26	-4,46	-2,58	H_1	-116	-68
0-3	22	22	0*	49*	H_1	-117	-50
0-4	24	24	0*	61*	H_1	-118	-33
1-2	30	30	-4,79	-2,58	H_1	-91	-69
1-3	26	25	0*	68*	H_1	-91	-50
1-4	31	31	-4,86	-2,58	H_1	-92	-34
2-3	31	31	-4,84	-2,58	H_1	-69	-52
2-4	30	30	-4,78	-2,58	H_1	-69	-33
3-4	30	30	-4,78	-2,58	H_1	-52	-34

In den Tabellen 6.4 und 6.5 ist neben der Stichprobengröße n die Anzahl der von null verschiedenen Bewertungen n_{red} angegeben. Für den Wilcoxon-Vorzeichen-Rang Test sind nur die von null verschiedenen Bewertungen bestimmend. Die Spalte z_{emp} enthält den aus dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang Test ermittelten Testwert, während die Spalte z_{krit} den zur Zurückweisung der Nullhypothese notwendigen z-Wert angibt. Die Nullhypothese kann zurückgewiesen werden, wenn der aus der Stichprobe ermittelte z-Wert den kritischen z-Wert unterschreitet. Für Stichprobenumfänge mit weniger als 26 Werten muss auf tabellierte z-Werte zurückgegriffen werden. In diesem Fall sind die Ergebnisse mit einem Asterisk (*) gekennzeichnet. Auch hier muss zur Zurückweisung der Nullhypothese der empirische z-Wert den kritischen z-Wert unterschreiten. Neben der akzeptierten Hypothese ist der mittlere Zeitverzug der getesteten Systemauslegungen angegeben (siehe Kapitel 10.5 im Anhang).

Aus den Testergebnissen des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests werden hoch signifikante Änderungen der Fahrzeugantwort anhand der Verschiebung der Querbesehleunigung für alle Kombinationen der Systemauslegung nachgewiesen (Tabelle 6.4). Die empirischen z-Werte z_{emp} zeigen, dass die Prüfungen mit einem noch kleineren Signifikanzniveau ebenfalls erfolgreich wären, da die zur Ablehnung der Nullhypothese notwendigen z-Werte (z_{krit}) deutlich unterschritten werden.

Kombination (i-j)	<i>n</i>	<i>n_{red}</i>	<i>z_{emp}</i>	<i>z_{krit,0,99}</i>	<i>H_{akzept}</i>	$\overline{\tau}_{\psi,i}$ [ms]	$\overline{\tau}_{\psi,j}$ [ms]
0-1	28	28	-4,63	-2,58	H ₁	-75	-84
0-2	26	26	-4,46	-2,58	H ₁	-75	-94
0-3	22	22	0*	49*	H ₁	-76	-105
0-4	24	24	0*	61*	H ₁	-75	-114
1-2	30	30	-4,78	-2,58	H ₁	-85	-95
1-3	26	26	-4,46	-2,58	H ₁	-84	-104
1-4	31	31	-4,86	-2,58	H ₁	-85	-113
2-3	31	31	-4,86	-2,58	H ₁	-94	-104
2-4	30	30	-4,78	-2,58	H ₁	-94	-114
3-4	30	29	-4,67	-2,58	H ₁	-104	-113

Während der Manöverdurchführung wird den Fahrern eine Spannweite der zeitlichen Verschiebung der Querbeschleunigung relativ zum Lenkradwinkel von 17 ms (in der Kombination 1-2) bis zu 85 ms (in der Kombination 0-4) durch die Fahrzeugbewegung dargestellt.

Die Testergebnisse bezüglich der Änderungen von den Zeitverzügen zwischen der Gierrate und Lenkradwinkel sind für alle dargestellten Kombinationen ebenfalls hoch signifikant unterschiedlich. Für die Gierrate ergibt sich eine Spannweite der Änderung des Gierverzugs von 10 ms (in der Kombination 1-2) bis 39 ms (in der Kombination 0-4).

Aus den Verzugszeiten der Querbeschleunigung und der Gierrate wird für jedes Manöver der Phasenverzug von Querbeschleunigung und Gierrate gemäß Gleichung 6.10 ermittelt.

$$\Delta \tau = \tau_{ay} - \tau_{\psi} \quad (\text{Gl. 6.10})$$

In Tabelle 6.6 sind die objektiven Bewegungsgrößen aller bewerteten Manöverdurchfahrten getrennt nach Systemauslegungen dargestellt. Die Tabelle zeigt die Mittelwerte und Standardabweichung des Phasenverzugs aus Querbeschleunigung und Gierrate sowie des Zeitverzugs der Gierrate und des Zeitverzugs der Querbeschleunigung.

Die in der Tabelle angegebenen Zeitverzüge der Querbeschleunigung und der Gierrate weichen aufgrund der Rundung und Mittelwertbildung von den Zeitverzügen aus den Tabellen 6.4 und 6.5 geringfügig ab.

Tabelle 6.6: Objektive Daten zur Validierung der Änderung der Fahrzeugreaktion im Makrosinusversuch

Variante	n	\bar{k}	$\sigma(k)$	$\overline{\Delta\tau}$ [ms]	$\sigma(\Delta\tau)$ [ms]	$\overline{\tau_{\psi}}$ [ms]	$\sigma(\tau_{\psi})$ [ms]	$\overline{\tau_{ay}}$ [ms]	$\sigma(\tau_{ay})$ [ms]
0	100	0,00	0,00	-42	10	-75	4	-117	11
1	115	0,12	0,01	-7	8	-84	4	-92	10
2	117	0,20	0,02	26	10	-94	5	-69	9
3	109	0,26	0,03	53	17	-104	7	-51	13
4	115	0,31	0,03	80	22	-114	9	-34	15

Die mittlere Phasendifferenz aus Querbeschleunigung und Gierrate der Variante 0 beträgt -42 ms und der Variante 1 -7 ms. Variante 1 kommt der Phasengleichheit von Querbeschleunigung und Gierrate am nächsten. Die übrigen Varianten stellen im Mittel eine Phasendifferenz von 26 ms, 53 ms und 80 ms während der gegebenen Lenkeingaben im Makrosinusversuch ein. Aus den Ergebnissen der Mittelwerte und Streuungen der Phasendifferenz sowie aus den statistischen Tests der Verzugszeiten kann angenommen werden, dass eine gezielte und reproduzierbare Änderung der Phasendifferenz in den Versuchen mit normal geübten Fahrern stattfindet.

Die Streuungen der Zeitverzögerungen von Gierrate und Querbeschleunigung zeigen, dass die Varianz der Systemeinstellungen klein gegenüber dem Zeitverzug der Bewegungsgröße ist. Die geringen Streuungen des Querbeschleunigungs- und Gierratenverzugs plausibilisieren nachträglich die Ergebnisse der in den Tabellen 6.4 und 6.5 dargestellten statistischen Tests.

Die den Fahrern innerhalb eines Parcours dargestellte Änderung der Phasendifferenz ist in Tabelle 6.7 für alle untersuchten Kombinationen der Systemauslegungen dokumentiert. Mit den Kombinationen 3-4 und 0-4 ergibt sich eine Spannweite des Phasenverzugs von 27 ms bis 125 ms.

Kombination (i-j)	$ \overline{\Delta \tau_j} - \overline{\Delta \tau_i} $ [ms]	$\sigma(\overline{\Delta \tau_j} - \overline{\Delta \tau_i})$ [ms]
3-4	27	9
3-2	28	9
1-2	32	6
0-1	35	6
2-4	56	11
3-1	62	15
0-2	68	11
1-4	87	20
0-3	96	19
0-4	125	23

6.2.4 Fazit Makrosinusversuch

Der Vergleich der statistischen Analysen der Fahrerbewertungen und objektiven Daten zeigt, dass für keine Frage ein signifikanter Unterschied zwischen den untersuchten Systemauslegungen nachgewiesen werden konnte, obwohl sehr signifikante Unterschiede anhand der Fahrdynamikgrößen nachweisbar sind. Mit den im Paarvergleich untersuchten Systemauslegungen werden im Makrosinusversuch Zeitverzögerungen zwischen der Querbeschleunigung und Gierrate von -42 ms bis +80 ms versuchstechnisch abgedeckt. Ein Zusammenhang der Systemauslegung und der Bewertungen der Fahrer konnte durch die Makrosinusversuche nicht nachgewiesen werden.

6.3 Systemauslegung im Spurwechsel

Der Beleg zur Bewährung oder zur Falsifikation der Sensitivität der Fahrer bezüglich der Phasendifferenz erfordert auch Versuche im Spurwechsel, da abhängig von der Fahraufgabe eine unterschiedliche Gewichtung der Bewegungsgrößen vorliegt. In Spurwechselmanövern hat die Querbeschleunigung eine größere Gewichtung als die Gierrate.¹⁶⁸

Die Versuche des Spurwechsels sind derart ausgelegt, dass beim Befahren eine zu den Makrosinusversuchen vergleichbare Systemreaktion des Fahrzeugs hervorgerufen wird. Durch ein in Betrag von Querbeschleunigung und Gierrate vergleichbarem Manöver wird ein

¹⁶⁸ Sano et al. (1979): The Effect of Improved Vehicle Dynamics on Drivers Control Performance

späterer Vergleich der Ergebnisse aus Makrosinus- und Spurwechselversuch erleichtert, da bei gleichem Zeitverzug Ergebnisunterschiede auf die Manöver zurückgeführt werden können. Der Spurwechsel ist, im Gegensatz zum Makrosinusversuch, ein kurzzeitiges Manöver im in-stationären Fahrzustand mit stationären Ein- und Ausfahrten.

Die Analyse der Fahrerbewertungen erfolgt analog zur Auswertung der Makrosinusversuche. Im Unterschied zu den Makrosinusversuchen erfolgt hier der Nachweis der Zeitdifferenzen durch die Kreuzkorrelation zwischen den zu analysierenden Signalen.

6.3.1 Abhängigkeit der Fahrerbewertung von der Versuchsreihenfolge

Zur Erhöhung der Trennschärfe des Tests können zwei gleiche Versuche, die die gleichen Systemauslegungen im Experiment gegenüberstellen, gemeinsam untersucht werden, wenn kein Einfluss der Untersuchungsreihenfolge auf die Bewertung nachgewiesen ist. Wie im vorangegangenen Abschnitt wird auch hier der Kolmogorow-Smirnow-Test zum Nachweis auf Gleichheit der Stichproben zweier Permutationen mit identischen Elementen eingesetzt. Der Vergleich wird zu einem Signifikanzniveau von 5 % durchgeführt. Die Ergebnisse der Tests sind in Tabelle 6.8 dargestellt.

Die Ergebnisse der Tabelle 6.8 zeigen, dass eine unterschiedliche Bewertungsverteilung zweier Systemauslegungen in unterschiedlicher Reihenfolge nicht nachgewiesen werden kann. Es wird daher eine gleiche Bewertungsverteilung angenommen. Dieses Ergebnis gilt für alle Fragen des Spurwechsels.

Das Ergebnis ist robust bis zu einem Signifikanzniveau von 8,2 %. Bei der Wahl eines Signifikanzniveaus von 8,2 % kann ein erster Einfluss der Versuchsreihenfolge für die Kombination der Systemauslegungen 0-1 in der Frage der Direktheit nachgewiesen werden. Eine schlüssige Interpretation kann durch dieses Einzelergebnis jedoch nicht aufgebaut werden, da ein weiterer Einfluss der Untersuchungsreihenfolge auf die Bewertung der Direktheit der Fahrzeugantwort erst für ein Signifikanzniveau von 68,8 % in der Kombination 2-4 möglich wäre. Einflüsse auf die übrigen Fragen wären erst ab einem Signifikanzniveau von 21,6 % (Überschwingen, Kombination 1-4) oder 24,6 % (Schnelligkeit, Kombination 2-4) nachweisbar. Dieses Signifikanzniveau ist für einen Reihenfolgenachweis aber zu hoch.

Mit der gewählten Signifikanzgrenze von 5 % und den in Tabelle 6.8 dargestellten Ergebnissen ist davon auszugehen, dass der Einfluss der Versuchsreihenfolge auf die Bewertung der Fahrer im Spurwechselversuch nicht berücksichtigt werden muss. Für die weiteren Analysen kann daher auf eine gesonderte Darstellung der Versuchsreihenfolge verzichtet werden.

Tabelle 6.8: Test der Versuchsreihenfolge auf die Bewertung bezüglich der Errogen der Direktheit, der Schnelligkeit, der Beanspruchung und des Überschwingens (Drehung um die Hochachse) bei 80 km/h im Spurwechselversuch (Signifikanzniveau 5 %).

K_{ij}	K_{ji}	n_{ij}	n_{ji}	Schnelligkeit			Direktheit			Beanspruchung			Überschwängen		
				H_{akzept}	K	max(N_i-N_j)	H_{akzept}	K	max(N_i-N_j)	H_{akzept}	K	max(N_i-N_j)	H_{akzept}	K	max(N_i-N_j)
0-1	1-0	15	17	H ₀	0,853	0,204	H ₀	0,082	0,424	H ₀	0,766	0,224	H ₀	0,346	0,314
0-2	2-0	16	17	H ₀	0,781	0,217	H ₀	0,937	0,176	H ₀	0,437	0,287	H ₀	0,937	0,176
0-3	3-0	16	16	H ₀	0,912	0,188	H ₀	0,912	0,188	H ₀	0,912	0,188	H ₀	0,912	0,188
0-4	4-0	16	15	H ₀	0,933	0,183	H ₀	1,000	0,121	H ₀	0,491	0,283	H ₀	0,754	0,229
1-2	2-1	16	15	H ₀	0,962	0,171	H ₀	0,997	0,138	H ₀	1,000	0,108	H ₀	0,944	0,179
1-3	3-1	15	17	H ₀	0,985	0,153	H ₀	0,994	0,141	H ₀	0,533	0,271	H ₀	0,853	0,204
1-4	4-1	15	16	H ₀	0,999	0,125	H ₀	0,986	0,154	H ₀	0,734	0,233	H ₀	0,216	0,358
2-3	3-2	16	16	H ₀	1,000	0,063	H ₀	0,999	0,125	H ₀	0,348	0,313	H ₀	0,912	0,188
2-4	4-2	19	13	H ₀	0,246	0,348	H ₀	0,688	0,243	H ₀	1,000	0,105	H ₀	0,997	0,138
3-4	4-3	13	17	H ₀	1,000	0,118	H ₀	0,899	0,199	H ₀	0,750	0,235	H ₀	0,949	0,18

6.3.2 Fahrerbewertung im Spurwechsel

Die Bewertung der Fahrzeugreaktion durch die Fahrer wird durch die Fragen nach dem Ansprechverhalten des Fahrzeugs auf die Fahrerlenkeingabe (Schnelligkeit und Direktheit) erfasst. Die Ergebnisse der Varianzanalysen zu diesen Fragen sind in Tabelle 6.9 dargestellt.

Schnelligkeit	QS	FHG	$\hat{\sigma}^2$	H_{emp}	$\chi^2_{9;0.95}$	H_{akzept}
Kombinationen	30328	9	3370	3,84	16,92	H_0
Fehler	2459992	306	8039			
Total	2490320	315				

Direktheit	QS	FHG	$\hat{\sigma}^2$	H_{emp}	$\chi^2_{9;0.95}$	H_{akzept}
Kombinationen	24316	9	2702	3,06	16,92	H_0
Fehler	2479241	306	8102			
Total	2503557	315				

Die Ergebnisse der Varianzanalysen zeigen, dass die empirisch ermittelten Kennwerte H_{emp} deutlich von dem zur Zurückweisung der Nullhypothese notwendigen Wert von 16,92 entfernt sind. Daraus folgt, dass durch die Varianzanalyse ein Einfluss der Systemauslegung auf die Fahrerbewertung des Ansprechverhaltens im Spurwechsel nicht nachgewiesen werden kann. Da aufgrund der Hypothesenart der β -Fehler nicht angegeben werden kann, fehlt der statistische Beleg für die Unabhängigkeit der Fahrerbewertung von der Systemauslegung. Der Vergleich der Quadratsummen der Kombinationen und der Fehler zeigt jedoch in beiden Fällen größere Quadratsumme für die Fehler als für die bewerteten Kombinationen. Für die bewertete Schnelligkeit der Fahrzeugreaktion auf die Lenkeingabe ergibt sich damit eine Varianzaufklärung von 1,2 % und für die Frage der Direktheit der Fahrzeugreaktion eine Varianzaufklärung von nur 1,0 %. Die Ergebnisse der Varianzaufklärung weisen auf einen sehr geringen Einfluss der Systemauslegung auf die Fahrerbewertung hin.

Der Einfluss der Systemauslegung auf die bewertete Beanspruchung während der Manöverdurchfahrt ist in Tabelle 6.10 angegeben. Auch hier gelingt es nicht, mit den Ergebnissen der Varianzanalyse einen Einfluss der Systemauslegung auf die Beanspruchung der Fahrer nachzuweisen, da der notwendige Kennwert für eine Ablehnung der Gleichheit zu einem Signi-

fikanzniveau von 5 % durch keine Kombination der Systemauslegung erreicht wird. Anhand der Quadratsumme der Kombinationen und der Gesamtquadratsumme kann hier nur ein geringer Einfluss der Systemauslegung auf die bewertete Beanspruchung ermittelt werden. Eine Beeinflussung ist daher sehr unwahrscheinlich. Für die Varianzaufklärung der bewerteten Beanspruchung bezüglich der Systemauslegung kann nur ein Wert von 4,7 % ermittelt werden.

Beanspruchung	QS	FHG	$\hat{\sigma}^2$	H_{emp}	$\chi^2_{9;0.95}$	H_{akzept}
Kombinationen	117299	9	13033	14,75	16,92	H_0
Fehler	2387679	306	7803			
Total	2504979	315				

Im Spurwechselparcours wurde zusätzlich noch das Überschwingen des Fahrzeugs nach dem Wechsel der Fahrgasse zur Bewertung der Systemauslegungen angeboten. In Tabelle 6.11 ist der Einfluss der Systemauslegung auf die Bewertung der Fahrer bezüglich dieser Reaktion des Fahrzeugs aufgezeigt. Durch die Varianzanalyse wird hier bei einem Signifikanzniveau von 5 % für mindestens eine Kombination eine Abhängigkeit der Fahrerbewertungen von der Systemauslegung nachgewiesen.

Überschwingen	QS	FHG	$\hat{\sigma}^2$	H_{emp}	$\chi^2_{9;0.95}$	H_{akzept}
Kombinationen	220346	9	24483	27,93	16,92	H_1
Fehler	2264567	306	7401			
Total	2484913	315				

Für eine detailliertere Analyse werden die Fahrerbewertungen des Überschwingens für jede Kombination der Systemauslegung mit Hilfe des Wilcoxon-Rangsummen Tests verglichen (Methode siehe Kapitel 6.2.3). Aus den Ergebnissen dieses Tests zeigt Tabelle 6.12, dass die Kombinationen 0-1, 0-3, 1-2 und 2-4 von den Fahrern zu einem Signifikanzniveau von 5 % signifikant unterschiedlich bewertet werden.

Eine Interpretation des bewerteten Überschwingverhaltens wird erschwert, da zwar zwei benachbarte Systemauslegungen differenziert wahrgenommen werden, aber Systemauslegungen

Kombination (i-j)	n	n _{red}	Z _{emp}	Z _{krit,0,95}	H _{akzept}
0-1	32	21	40*	59*	H ₁
0-2	33	21	90,5*	59*	H ₀
0-3	32	26	-2,62	-1,96	H ₁
0-4	31	24	119*	81*	H ₀
1-2	31	22	63,5*	66*	H ₁
1-3	32	19	79*	46*	H ₀
1-4	31	24	149,5*	81*	H ₀
2-3	32	19	81,5*	46*	H ₀
2-4	32	24	58*	81*	H ₁
3-4	30	18	56*	40*	H ₀

mit objektiv stärkerer Änderung der Fahrzeugantwort nicht signifikant unterschiedlich bewertet werden. Es darf hier aber nicht davon ausgegangen werden, dass die Gründe für die Bewertung in der fahrdynamischen Antwort auf die Lenkeingaben im Spurwechsel zu finden sind, da eine lineare Abhängigkeit zwischen der Änderung der Systemantwort und der Fahrerbewertung nicht zwingend bestehen muss. Die große Quadratsumme der Fehler und die damit verbundene geringe Varianzaufklärung von 8,9 % deuten aber auf eine Ursache außerhalb der im Versuch kontrollierten Parameter hin.

6.3.3 Validierung der Systemauslegung im Spurwechsel

Die Ergebnisse des vorangegangenen Abschnitts zeigen keine belastbaren Hinweise auf einen Einfluss der Systemauslegung auf die Fahrerbewertungen. Der Beleg einer fehlenden Sensitivität der Fahrer auf Änderungen der Systemauslegung im Spurwechsel erfordert den Nachweis, dass das Systemverhalten in den Versuchen tatsächlich verändert wurde.

Die Auswertung der objektiven Größen erfolgt identisch zu den Makrosinusversuchen. Auch hier werden die Zeitdifferenzen zwischen Lenkradwinkel und Querschleunigung bzw. Gierrate zweier Systemauslegungen statistisch mit dem Wilcoxon-Rangsummen Test auf eine unterschiedliche Verteilung getestet. Dabei wird von einer Gleichverteilung ausgegangen (Nullhypothese) und mit genügend großen Differenzen zwischen der Systemauslegung ein

Unterschied signifikant nachgewiesen (Alternativhypothese). Die Analysen der Fahrzeugreaktion werden auch in den Spurwechselmanövern mit einem Signifikanzniveau von 1 % durchgeführt, um einen Unterschied zwischen den zu testenden Systemauslegungen sicher nachweisen zu können.

Die Ergebnisse der Zeitdifferenzen zwischen dem Lenkradwinkel und der Gierrate sind in Tabelle 6.13 dargestellt. Aus den für das Signifikanzniveau akzeptierten Hypothesen kann entnommen werden, dass alle im Versuch untersuchten Kombinationen zu sehr signifikant

Tabelle 6.13: Vergleich des Zeitverzugs zwischen Lenkradwinkel und Gierrate im Spurwechsel (Signifikanzniveau 5 %) (kennzeichnen tabellierte z-Werte).*

Kombination (i-j)	n	n_{red}	z_{emp}	$z_{\text{krit}, 0,99}$	H_{akzept}	$\overline{\tau_{\dot{\psi}, i}} [\text{ms}]$	$\overline{\tau_{\dot{\psi}, j}} [\text{ms}]$
0-1	31	23	14*	55*	H_1	-80	-86
0-2	32	28	-4,18	-2,58	H_1	-81	-93
0-3	32	32	-4,95	-2,58	H_1	-78	-102
0-4	30	30	-4,79	-2,58	H_1	-78	-111
1-2	31	28	-3,91	-2,58	H_1	-87	-93
1-3	31	31	-4,87	-2,58	H_1	-85	-102
1-4	32	31	-4,87	-2,58	H_1	-87	-111
2-3	31	28	-4,42	-2,58	H_1	-93	-103
2-4	31	30	-4,79	-2,58	H_1	-92	114
3-4	30	27	-4,36	-2,58	H_1	-104	-114

unterschiedlichen Zeitdifferenzen führen. Dabei liefert die Kombination 0-4 die größte Veränderung des Gierratenverzugs und die Kombinationen 0-1 und 1-2 die kleinste Änderung des Gierratenverzugs. Die Kombinationen 0-1 und 1-2 bieten mit einem Zeitverzug der Gierrate von 6 ms den Fahrern kaum Gelegenheit zur unterschiedlichen Bewertung. Dennoch trennt der Test bei einem Signifikanzniveau von 1 % die beiden Verteilungen des Gierratenverzugs. Die größte Differenz von 33 ms zwischen den Zeitverzügen zwischen Lenkradwinkel und Gierrate wird in der Kombination 0-4 erreicht. Auch hier sind die Verteilungen der Zeitverzüge der einzelnen Systemauslegungen signifikant unterschiedlich. Alle übrigen Kombinationen liefern im Spurwechsel Zeitdifferenzen, die sich zwischen die beiden Extrema einordnen.

Für den Zeitverzug zwischen Lenkradwinkel und die Querbeschleunigung ergeben sich die in Tabelle 6.14 dargestellten Zusammenhänge. Auch hier zeigen alle Kombinationen signifikant unterschiedliche Verteilungen der Zeitverzüge. Die Kombination 0-4 erreicht mit 88 ms die

größte Änderung des Querschleunigungsverzugs. Die Kombination 3-4 weist mit einer Änderung des Querschleunigungsverzugs von 15 ms die geringste Änderung der Querschleunigungsreaktion auf. Die übrigen Kombinationen weisen Änderungen des Querschleunigungsverzugs zwischen den beiden Extrema auf.

Kombination (i-j)	n	n_{red}	z_{emp}	$z_{\text{krit}, 0,99}$	H_{akzept}	$\overline{\tau_{a_y, i}}$ [ms]	$\overline{\tau_{a_y, j}}$ [ms]
0-1	31	31	-4,82	-2,58	H_1	-120	-90
0-2	32	32	-4,94	-2,58	H_1	-124	-64
0-3	32	32	-4,94	-2,58	H_1	-119	-43
0-4	30	30	-4,79	-2,58	H_1	-118	-30
1-2	31	31	-4,87	-2,58	H_1	-91	-65
1-3	31	31	-4,87	-2,58	H_1	-88	-88
1-4	32	32	-4,94	-2,58	H_1	-91	-29
2-3	31	31	-4,83	-2,58	H_1	-63	-63
2-4	31	31	-4,86	-2,58	H_1	-64	-27
3-4	30	30	-4,45	-2,58	H_1	-44	-29

Der Phasenverzug zwischen der Querschleunigung und Gierrate wird analog zu den Versuchen des Makrosinusversuchs nach Gleichung 6.10 bestimmt. In Tabelle 6.15 sind für jede Systemauslegung der mittlere Phasenverzug und die Standardabweichung des Phasenverzugs dargestellt. Tabelle 6.15 enthält die Mittelwerte und Standardabweichungen des Gier- und Querschleunigungsverzugs.

Die Ergebnisse zeigen auch in diesen Versuchen, dass trotz des interindividuellen Fahrereinflusses eine in engen Grenzen reproduzierbare Änderung der Systemreaktion stattfindet. Der Vergleich zu den Ergebnissen des Makrosinusversuchs in Tabelle 6.6 zeigt, dass der mittlere Phasenverzug im Spurwechsel um nicht mehr als 3 ms von denen des Makrosinusversuchs abweicht. Die Streuungen des Phasenverzugs sind im Spurwechselversuch um nicht mehr als 5 ms größer. Die Abweichungen des Gier- und Querschleunigungsverzugs sind gegenüber den Ergebnissen des Makrosinusversuchs nur geringfügig größer.

Die Änderungen der mittleren Phasendifferenz innerhalb eines Parcours stellt Tabelle 6.16 dar. Auf Basis der im Fahrzeug erfassten Messdaten der Querschleunigung und der Gierrate wird den Fahrern eine Änderung des Phasenverzugs von 28 ms (Kombination 3-4) bis zu 121 ms (Kombination 0-4) im Spurwechselparcours zur Bewertung angeboten. Die übrigen

Variante	n	\bar{k}	$\sigma(k)$	$\overline{\Delta \tau}$ [ms]	$\sigma(\Delta \tau)$ [ms]	$\overline{\tau_{\psi}}$ [ms]	$\sigma(\tau_{\psi})$ [ms]	$\overline{\tau_{ay}}$ [ms]	$\sigma(\tau_{ay})$ [ms]
0	125	0	0	-44	12	-79	8	-121	16
1	125	0,12	0,01	-8	10	-86	7	-90	11
2	125	0,20	0,02	23	13	-93	8	-64	12
3	124	0,26	0,03	54	21	-103	10	-44	17
4	123	0,31	0,03	81	27	-112	12	-29	20

Kombinationen der Systemauslegungen decken das Intervall zwischen den beiden Grenzen der minimalen und maximalen Phasendifferenz ab. Die Streuungen der Änderungen der Phasendifferenz erlauben auch in Spurwechselmanövern noch eine Unterscheidung der dargebotenen Systemauslegungen.

Tabelle 6.16: Differenz (Abstand) und Streuung zwischen den Zeitverzügen aus Querbesehleunigung und Gierrate innerhalb einer Versuchsfahrt (zwei Manöver) im Spurwechselversuch.

Kombination (i-j)	$ \overline{\Delta \tau_j} - \overline{\Delta \tau_i} $ [ms]	$\sigma(\overline{\Delta \tau_j} - \overline{\Delta \tau_i})$ [ms]
3-4	28	15
3-2	30	16
1-2	31	11
0-1	35	16
2-4	61	21
3-1	61	18
0-2	69	21
1-4	87	23
0-3	96	29
0-4	121	32

6.3.4 Fazit Spurwechselversuch

Der Vergleich der statistischen Analysen der Fahrerbewertungen und fahrdynamischen Daten zeigt, dass trotz der sehr signifikanten Unterschiede der Fahrzeugreaktion kein Zusammenhang zwischen der fahrdynamischen Änderung und der Bewertung der Fahrer statistisch nachgewiesen werden kann. Die von den statistischen Tests identifizierten Unterschiede können in keinen kausalen Zusammenhang mit den fahrdynamischen Änderungen gebracht werden. Daraus folgt, dass die Fahrer auf die Veränderung der Zeitverzögerungen zwischen der Querschleunigung und der Gierrate im Bereich von -44 ms bis +81 ms im Spurwechseltest als nicht ausreichend sensitiv betrachtet werden müssen. Ein Zusammenhang der Systemauslegung und der Bewertungen der Fahrer kann durch Bewertung der Systemauslegungen unter einer geänderten Gewichtung der Bewegungsgrößen im Spurwechselversuch nicht nachgewiesen werden.

6.4 Fazit Systemauslegung

Die Versuche des Makrosinus und des Spurwechsels haben zum Ziel, einen Zusammenhang zwischen der Systemauslegung und der Fahrerbewertung bei gleichzeitiger Beanspruchung durch die Versuchsaufgabe aufzuzeigen. In dieser Arbeit wird die Systemauslegung durch eine gezielte zeitliche Verschiebung der Querschleunigung und Gierrate im Versuch dargestellt. Der Makrosinusversuch und der Spurwechselversuch decken bei gemeinsamer Verwendung eine unterschiedliche Gewichtung der durch die Systemauslegung beeinflussten Bewegungsgrößen ab.

In den Makrosinusversuchen kann der resultierende Phasenverzug zwischen der Querschleunigung und Gierrate von -42 ms bis +80 ms und in den Spurwechselversuchen von -44 ms bis +81 ms gezielt verändert werden. Den normal geübten Fahrern werden dadurch Änderungen des Phasenverzugs von 27 ms bis 125 ms im Makrosinusversuch und von 28 ms bis 121 ms im Spurwechselversuch zur Sensierung angeboten.

Aus der Analyse der Fahrerbewertungen kann für die Gesamtheit ein statistischer Zusammenhang zu der Änderung der Systemauslegung nicht aufgezeigt werden. Vereinzelt Kombinationen der Systemauslegung werden Spurwechsel durch die Tests als signifikant unterschiedlich identifiziert. Eine detaillierte Analyse der signifikanten Unterschiede liefert aber keine Hinweise auf einen kausalen Zusammenhang zwischen der Änderung der Systemauslegungen und der Fahrerbewertungen. Die geringen Erklärungsbeiträge der Systemauslegung auf die Fahrerbewertungen deuten ebenfalls darauf hin, dass die Streuung der Fahrerbewertungen oder in diesen Versuchen nicht kontrollierte Einflussgrößen für die Fahrerbewertungen bestimmend sind.

Für die aufgestellten Hypothesen bezüglich der Systemauslegungen bedeuten diese Ergebnisse im gewählten Bereich und den gewählten Versuchsbedingungen, dass normal geübte Fahrer Systemauslegungen anhand eines veränderten Phasenverzugs nicht unterscheiden

können. Aufgrund der nicht identifizierten Sensitivität der Fahrer auf den Phasenverzug kann eine untere Schranke der Sensitivität nicht angegeben werden.

Für die Hypothese zur Beanspruchungsreduktion muss aufgrund der Fahrerbewertungen festgestellt werden, dass mit den hier durchgeführten Versuchen ein Zusammenhang zwischen der Änderung des Phasenverzugs und der bewerteten Beanspruchung nicht identifiziert werden kann. Auch die geringen Erklärungsbeiträge liefern hier einen Hinweis, dass andere Größen als die variierten Phasendifferenzen oder durch den Versuch kontrollierte Parameter für die Fahrerbewertungen bestimmend sind.

Eine Falsifikation der Hypothesen durch eine Anpassung der Signifikanzgrenzen ist nicht möglich, da die Signifikanzgrenze in einen Bereich verschoben werden müsste, der die Notwendigkeit statistischer Untersuchungen entbehrt. Bei der Wahl größerer Signifikanzgrenzen wird eine größere Anzahl signifikant unterschiedlicher Bewertungen identifiziert, ein schlüssig interpretierbares Ergebnis kann damit jedoch nicht erbracht werden, da die Reihenfolge der dann signifikant unterschiedlichen Kombinationen in keinem Zusammenhang zur Systemauslegung steht. Eine weitere Analyse fahrdynamischer Bewegungsgrößen wird daher keine weiterführende Erklärung leisten können.

7 Systemstörungen

Die Identifikation einer maximalen Störung der Fahrzeugbewegung, die durch den Fahrer noch kontrolliert werden kann, stellt für die Auslegung eines elektrisch gesteuerten Lenksystems eine wichtige Kenngröße dar. Neben der Quantifizierung der Störungsreaktion in fahrzeugunabhängigen Größen, die eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Fahrzeuge als das Untersuchungsfahrzeug erleichtert, wird auch der Ort der Störung (Vorder- oder Hinterachse) als ein wichtiges Bewertungskriterium angesehen. Die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Störungen liefert hierbei die Grundlage zur Bearbeitung der Störungshypothesen.

7.1 Störungen der Fahrzeugbewegung

Abbildung 7.1 zeigt jeweils einen repräsentativen Zeitverlauf der Gierrate, Querbeschleunigung, Lenkradwinkel und Lenkradmoment infolge eines Stör lenkwinkels an der Vorderachse im Closed-Loop-Versuch.

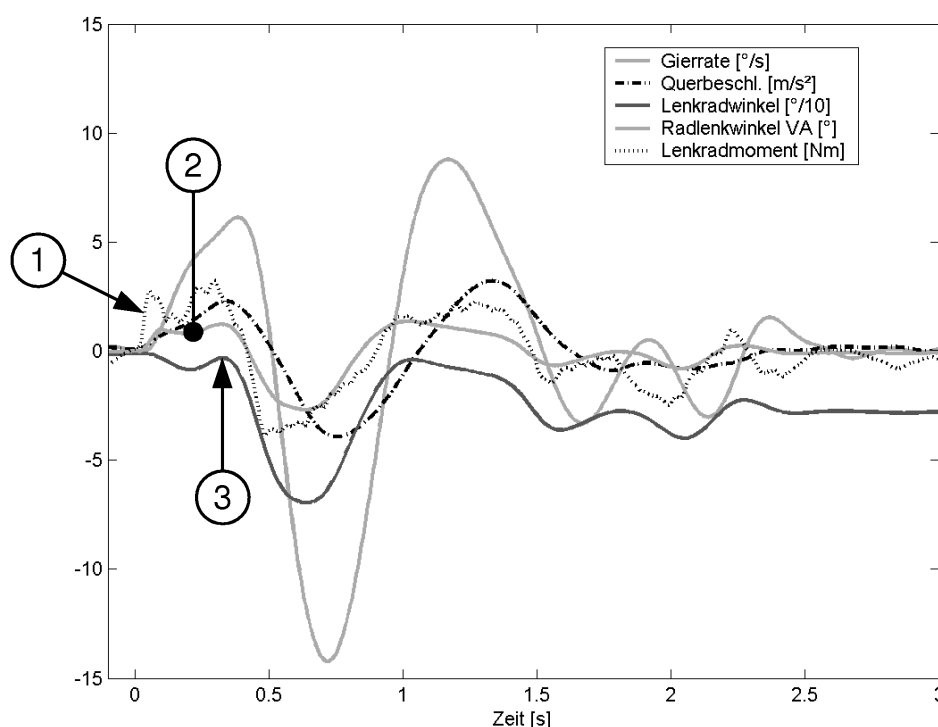


Abbildung 7.1: Störung der Fahrzeugbewegung im Closed-Loop-Versuch durch einen aufgeprägten Radlenkwinkelsprung von $1,6^\circ$ an den Vorderrädern bei 100 km/h (der Lenkradwinkel ist um den Faktor 1/10 skaliert dargestellt).

Die Störung wird versuchstechnisch durch einen zusätzlichen Motorwinkel des Überlagerungslenkgetriebes hervorgerufen. Der fahrdynamisch wirksame Störwinkel am Vorderrad wird durch die Nachgiebigkeit des Hand-Arm-Apparats des Fahrers gegenüber einem bei fixiertem Lenkrad ermittelten Radlenkwinkel verzögert aufgebracht oder auch in der

Amplitude reduziert. Aus Abbildung 7.1 ist die Reduktion des Radlenkwinkels an dem Nachgeben des Lenkradwinkelsignals bis zur Markierung 3 zu erkennen. Die in den Versuchen untersuchten Radlenkwinkel beziehen sich daher auf einen nominellen Radlenkwinkel, der aus dem Motorlagewinkel des Überlagerungsmotors und der wirksamen Übersetzung auf die Vorderräder unter der Annahme eines fixierten Lenkrades bestimmt wird.

Aufgrund der Störung an der Vorderachse folgt der unmittelbare Anstieg des Radlenkwinkels an der Vorderachse (siehe Lenkradmoment (Abstützmoment), Markierung 1 in Abbildung 7.1) und damit auch der Gierrate und der Querbesehleunigung. Durch das an der Vorderachslenkung vorhandene Additionsgetriebe hat der Motorstörwinkel eine zu den Vorderrädern entgegengesetzte Änderung des Lenkradwinkels zur Folge, da das Moment des Lenkmotors an den Abtrieben zum Lenkgetriebe und Lenkrad abgestützt werden muss.¹⁶⁹ Durch die Trägheit des Lenkrades und des angekoppelten Hand-Arm-Apparats des Fahrers wird der Lenkradwinkel verzögert ausgebildet und hat eine direkte Auswirkung auf den sich ausbildenden Störwinkel an den Vorderrädern. Die Bildung des Radstörwinkels und des Lenkradstörwinkels ist hier nach 150 ms (Markierung 2) abgeschlossen (die Zeit variiert mit dem Betrag der Störung und dem Grad der Fahrerankopplung). Infolge der Störung des Lenkradwinkels reduziert der Fahrer den Lenkradwinkel (fertigkeitbasierte Handlung zur Stabilisierung des Fahrzeugs, Reduktion Lenkradwinkel bis zur Markierung 3)¹⁷⁰ und vergrößert dadurch den Radlenkwinkel der Vorderräder. Querbesehleunigung und Gierrate steigen weiter an. Ab 300 ms nach Beginn der Störung korrigiert der Fahrer (ab Markierung 3 in Abbildung 7.1) mit großem Lenkradwinkel, die Störung. Aufgrund des großen Lenkradwinkels (hier -70°) kommt es zu einer deutlichen Störung der Fahrzeugbewegung, die nach 2,5 s nach Aufprägen des Störwinkels mit einem stationären Lenkradwinkel von 25° durch den Fahrer stabilisiert ist.

Einen identischen Störlenkwinkel an beiden Rädern der Hinterachse ist in Abbildung 7.2 dargestellt. In diesem Beispiel ist der Störwinkel der Hinterräder nach 100 ms zu 95 % des Endwertes ausgeprägt (vor Markierung 2). Die initiale Fahrzeugbewegung ist hier in entgegengesetzter Richtung zum Störlenkwinkel der Hinterräder. Die entstehende Drehbewegung des Fahrzeugaufbaus unter Beibehaltung der Fahrzeugbewegungsrichtung (Schwimmwinkel) hat das Ausbilden von Schräglaufwinkeln an den Vorderrädern zur Folge. Diese wiederum bilden Radseitenkräfte der Vorderräder aus, die über das Lenkgestänge und Lenkgetriebe in ein Lenkradmoment gewandelt werden. 150 ms nach Aufschalten der Störung kann daher eine Änderung des Lenkradmoments und des Lenkradwinkels beobachtet werden (zum Zeitpunkt der Markierung 2). Der Zeitpunkt des aktiven Fahrereingriffs kann hier, aufgrund der fehlenden Richtungsänderung des Lenkradwinkels, nicht eindeutig identifiziert werden. Der Beginn der Fahrerkompensation wird aber in gleicher Größenordnung (~ 300 ms nach Störaufschaltung) zur Störung durch das vordere Lenksystem erwartet und wird im Bereich der Markierung 3 gesehen (Knick des Lenkradwinkelsignals). Der Fahrer prägt zum Ausgleich

¹⁶⁹ Wesp et al. (2008): Vehicle Motion In Case Of Failure of Superposition Steering Systems

¹⁷⁰ Donges (1993): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für maßnahmen zur Aktiven Sicherheit im Straßenverkehr, S. 243

der Fahrzeugstörung einen zusätzlichen Lenkradwinkel auf, der über die notwendige Lenkkorrektur hinausgeht. Es kommt auch hier zu einer deutlichen Störung der Fahrzeugbewegung, die in diesem Beispiel in einer Zeit von 2,8 s durch den Fahrer ausgeregelt wird.

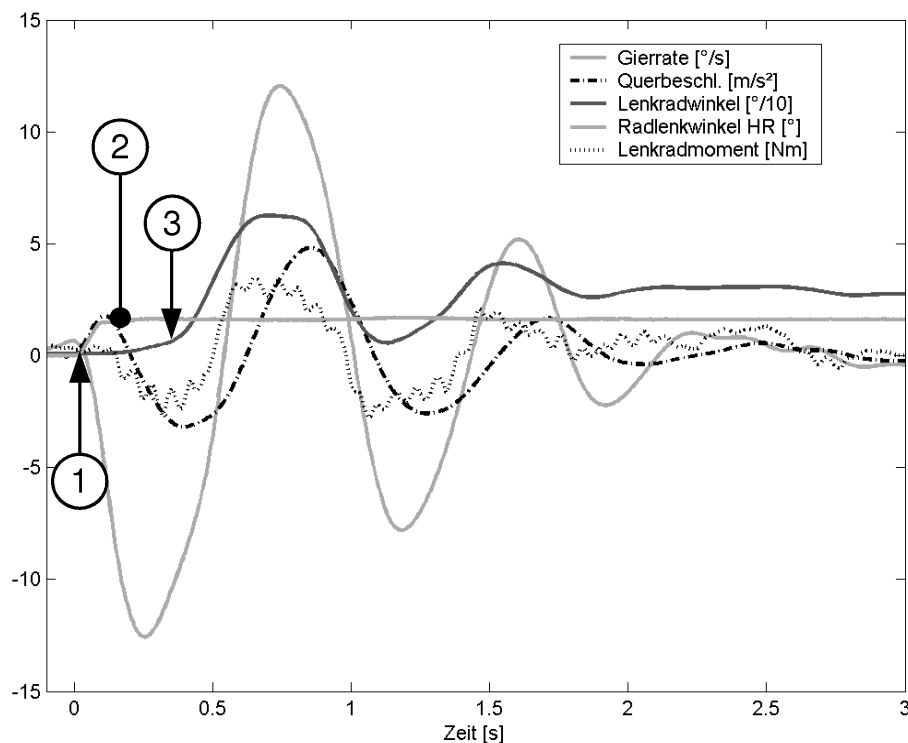


Abbildung 7.2: Störung der Fahrzeugbewegung im Closed-Loop-Versuch durch einen aufgeprägten Radlenkwinkelsprung von $1,6^\circ$ an beiden Rädern der Hinterachse bei 100 km/h.

Aufgrund der Störung durch das hintere Lenksystem erfolgt die Änderung des Lenkradmoments weniger schnell im Vergleich zur Änderung des Lenkradmoments infolge einer Störung durch das vordere Lenksystem. Daher ist auch die Änderung des Lenkradwinkels im Fall der Hinterradstörung geringer. Eine „Irritation“ des haptischen Kanals durch die Störung am Lenkrad ist damit weniger wahrscheinlich.

7.2 Datenaufbereitung

In Anlehnung an bereits bewährte Verfahren^{171,172,173} werden zur Hypothesenprüfung die Signale der Querbeschleunigung und der Gierrate als objektive Größen der Fahrzeugbewegung verwendet. Zur Filterung dieser und der übrigen benötigten Signale (wie z. B. Lenkradwinkel) wird einem Tiefpassfilter dritter Ordnung mit einer Eckfrequenz von 6 Hz eingesetzt. Zur Klassifizierung der Störungen wird ein nomineller Lenkwinkel der Vorderäder aus dem Ritzelwinkel bestimmt. Bei der Berechnung des nominellen Lenkwinkels wird

171 Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien

172 Ullmann et al. (2006): Der Normalfahrer als Messgröße für die Optimierung und Absicherung aktiver fahrdynamischer Regelsysteme

173 Schmidt et al. (2007): Auswirkung haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug System

eine konstante Lenkgetriebeübersetzung angenommen, da die Störungsversuche aus der Geradeausfahrt erfolgen, bei der die Nichtlinearität des Lenkdreiecks vernachlässigbar ist. Elastokinematische Effekte aus dem Fahrwerk und Lenksystem werden hier nicht berücksichtigt.

Aus dem zeitlichen Verlauf der Querbeschleunigung und Gierrate werden die Extrema der Fahrzeugreaktion ermittelt, die vor der Fehlerkompensation des Fahrers auftreten. Zur sicheren Bestimmung des Fahrzustands vor der Fehlerauslösung werden in der Auswertung nur Störungen berücksichtigt, deren Lenkwinkel im Zeitintervall von 1 s vor Störungsaufschaltung bis zur Aufschaltung im Bereich von $\pm 3^\circ$ Lenkradwinkel liegt. Auch darf für einen validen Störungsversuch das Geschwindigkeitsband $\pm 5 \text{ km/h}$ ¹⁷⁴ um die Sollgeschwindigkeit des Versuchs nicht verlassen werden. Aus den derart qualifizierten Störungen können die Extrema der offsetbereinigten¹⁷⁵ Querbeschleunigung und Gierrate ermittelt werden, sodass diese die Änderung der Bewegungsgrößen durch die Störung repräsentieren. Die durch die Störung entstehenden Extrema der Bewegungsgröße werden unterschieden in Extrema, die direkt auf die Störung zurückgeführt werden können (Erstreaktion) und für die eine aktive Kompensationshandlung des Fahrers sicher ausgeschlossen werden kann, und Extrema, die als Folge einer Kompensationsreaktion des Fahrers (Fehlerkompensation) entstehen. Zur Unterscheidung wird dabei angenommen, dass Extrema aufgrund einer aktiven Fahrerhandlung frühestens nach 300 ms nach Störungsaufschaltung nachgewiesen werden können, da rund 300 ms¹⁷⁶ bis zum Beginn der ersten Fahrer kompensationsreaktion vergehen. Eine bereits vorher einsetzende Fahrerreaktion könnte innerhalb dieses Zeitfensters kein Extrema der Querbeschleunigung oder Gierrate hervorrufen, sodass innerhalb dieses Zeitfensters identifizierte Extrema auf eine Fahrzeugreaktion infolge eines Stör lenkwinkels zurückgeführt werden können.

An der Untersuchung der Störung durch das hintere Lenksystem nehmen insgesamt 44 männliche normal geübte Fahrer teil. 31 Fahrer bewerten die Störungen durch das vordere oder hintere Lenksystem bei 50 km/h und 100 km/h und 13 Fahrer bei 150 km/h. Die Störungen in den Geradeausfahrten werden bezüglich des Störwinkels, der Richtung und des Orts (Störung an Vorderräder, beide Hinterräder oder nur einem Hinterrad) randomisiert aufgeschaltet, um die Wahrscheinlichkeit einer systematischen Verzerrung der Auswertung zu minimieren. Es werden insgesamt 1378 Bewertungsfahrten durchgeführt, von denen 425 bei 50 km/h, 422 bei 100 km/h, 172 bei 150 km/h und 359 bei 50 km/h in Kurvenfahrt von normal geübten Fahrern bewertet werden.

174 Alle Versuche werden mit einer Geschwindigkeitsregelanlage durchgeführt. Das Geschwindigkeitsband überprüft auch die richtige Einstellung der Geschwindigkeitsregelanlage.

175 Der Offset für die Querbeschleunigung und Gierrate wird aus dem Mittelwert des Zeitintervalls 0,3 s vor Störungsaufschaltung ermittelt.

176 Neukum et al. (2005): Bewertung der Funktionssicherheit aktiver Lenksysteme: ein Human Factor Ansatz, S.167

7.3 Ergebnisdarstellung

Die zur Hypothesenprüfung durchgeführten Versuche stellen aus Sicht der Statistik unabhängige Stichproben unter gegebenen Randbedingungen wie Fahrgeschwindigkeit und Art der Störung dar. Die zur Bewertung der Kritikalität der Störung eingesetzte Störungsbewertungsskala kann ebenso wie die objektiven Kennwerte, die aus den Messdatenaufzeichnungen gewonnen werden, durch statistische Methoden behandelt werden. Da die zu prüfenden Hypothesen (siehe Kapitel 4.4) einen Zusammenhang zwischen einer eingebrachten Störung durch das Lenksystem und der Einschätzung von Fahrern behaupten, bietet sich zur Prüfung des Hypotheseninhalts die Methode der nichtlinearen Regression an. Da jedoch der Störleinkwinkel der Räder für den Fahrer nicht sichtbar ist und der Fahrer über die Störung nur durch die Änderung der Bewegungsgrößen des Fahrzeugs und der Lenkreaktion informiert wird, wird ein Zusammenhang von Fahrzeugstörung (in Form der Extremwerte) und Störungsbewertung zur Prüfung verwendet.¹⁷⁷ Die erhobenen Bewertungen der Fahrer werden über den aus den Messdaten ermittelten objektiven Kennwerten (Extremwerte) aufgetragen. Der der Störung der Fahrzeugbewegung zugrunde liegende Störleinkwinkel ist im Diagramm nicht mehr sichtbar, jedoch ist er durch die Störungsbewertung und maximale Querschleunigung bzw. maximale Gierrate repräsentiert.¹⁷⁸ Als Repräsentanten für die Störung der Fahrzeugbewegung (objektive Kennwerte) werden die störungsinduzierten Extrema der Querschleunigung und Gierrate verwendet. Die Extrema, die in Folge der Kompensationsreaktion des Fahrers entstehen, unterliegen aufgrund fahrerindividueller Fahrstrategie und Reaktionsmuster¹⁷⁹ einer größeren Varianz und sind daher zur Repräsentation der Schwere einer Störung weniger gut geeignet.

Mit der Zuordnung der Fahrerbewertungen zu den fahrdynamischen Störungen, hier ausgedrückt durch die Extrema¹⁸⁰ der Querschleunigung und Gierrate, können die Fahrerbewertungen für identische fahrdynamische Störungen aber unterschiedlicher Störungsarten gegenübergestellt werden. Der Zusammenhang von Fahrerbewertung und maximaler fahrdynamischer Störung wird durch eine Ausgleichskurve der Form $y = a \cdot \arctan(b \cdot x)$ ¹⁸¹ mit den freien Parametern a und b dargestellt, da die Arcustangens-Funktion mit zunehmendem x einem Grenzwert zustrebt. Die Anpassung des Grenzwertes durch einen Parameter ist notwendig, da eine Bewertung der Kritikalität in Abhängigkeit der Störungsart erwartet wird, die mit ihrem Maximum nicht immer mit dem Skalenmaximum der Störungsbewertung übereinstimmen muss. Würde diese Anpassung fehlen, würden die Residuen einer Regression wider-

177 Neukum et al. (2005): Bewertung der Funktionssicherheit aktiver Lenksysteme: ein Human Factor Ansatz, S. 173

178 Die zugrunde liegenden Daten sind im Anhang in Kapitel 10.8 angegeben.

179 Jürgensohn et al. (1997): Die „Handschrift“ des Lenkens

180 Bei einem Störleinkwinkel der Vorderachse werden die maximale Querschleunigung und Gierrate als Extrema verwendet. Im Fall einer Störung an der Hinterachse werden die Minima der Querschleunigung bzw. Gierrate herangezogen (siehe hierzu die Abbildungen 7.1 und 7.2).

181 Andere Funktionen wie z. B. $y = a \cdot x^b$ oder $y = a \ln(x) + b$ würden die Anforderungen an eine Regressionskurve (positive Steigung aus dem Nullpunkt, kein Krümmungswechsel, weniger als drei Parameter) auch erfüllen. Die gewählte Regression zeigt jedoch gegenüber den Alternativen einen kleineren mittleren quadratischen Fehler (RMSE).

sprechen. Die Abbildung der nach oben gesättigten Störungsbewertung wird dadurch hier mit nur zwei Parametern ermöglicht (siehe Anhang 10.7).

Die Gegenüberstellung einer Störungsbewertung über den objektiven Größen der maximalen Querbeschleunigung und Gierrate dient zum direkten Vergleich der Störungen. Zur Erleichterung der Interpretation ist der Bereich gefährlich bewerteter Störungen in den Diagrammen gekennzeichnet (siehe auch Abbildung 5.4, S.50). Die von den Fahrern noch tolerierten Störungen besitzen Bewertungen, die kleiner oder gleich sechs sind, und sind in den unteren beiden Abschnitten der Diagramme aufgetragen. Zur leichteren Interpretation der Diagramme ist auch der Übergang „Störung des Fahrens“ zu „Spürbarkeit“ in den Diagrammen dargestellt.

Aufgrund der in den Stichproben enthaltenen inter- und intraindividuellen Varianz der Fahrerreaktionen ist eine Bestimmung der noch tolerierten Störungen aus diesen Diagrammen nicht zuverlässig möglich. In Anlehnung an den Code of Practice¹⁸² werden die von 85 % der Fahrer noch tolerierten Störungen aus der kumulierten Häufigkeit der unkritischen Fahrerbewertungen (Bewertungen 1 bis 6) ermittelt.

7.4 Beidseitige Störungen durch das hintere Lenksystem

Zur Prüfung der aufgestellten Behauptung, dass betragsgleiche Störungen der Fahrzeugbewegung kritischer von Fahrern bewertet werden, wenn sie von einem Lenksystem der Hinterachse ausgehen, werden die Störungsbewertungen der Vorderachse und beidseitige Störungen der Hinterachse gegenübergestellt.

In Abbildung 7.3 sind die Störungsbewertungen der Fahrer für Störungen der Vorderachse (192 Vorderachsstörungen) und der Hinterachse (134 beidseitige Störungen) in Geradeausfahrt für 50 km/h dargestellt. Das linke Diagramm zeigt die Bewertungen in Abhängigkeit der maximalen Querbeschleunigung infolge einer Störung, während das rechte Diagramm die gleichen Bewertungen in Abhängigkeit der maximalen Gierrate darstellt.

Störungen der Fahrzeugbewegung, die durch das vordere Lenksystem hervorgerufen werden, werden im Bereich von $3,3 \text{ m/s}^2$ bzw. $14 \text{ }^\circ/\text{s}$ von 50 % der Fahrer bereits als gefährlich bewertet. Beidseitige Störungen durch die Hinterachse werden bei dieser Geschwindigkeit nicht kritisch bewertet. Die Abbildung zeigt, dass durch Störungen des vorderen Lenksystems größere Störungen der Fahrdynamik möglich sind. Die geringeren Störreaktionen der beidseitigen Störung der Hinterräder, sind in dieser Arbeit auf den begrenzten Radlenkwinkel der Hinterräder von $1,6 \text{ }^\circ$ zurückzuführen.

Die identischen Störaufschaltungen bei 100 km/h zeigt zum Vergleich die Abbildung 7.4 (186 Vorderachs- und 135 beidseitige Hinterachsstörungen). Hier erreichen die Störungen deutlich höhere maximale Querbeschleunigungen und Gierraten. Im Mittel werden Störungen der Vorderachse ab $3,3 \text{ m/s}^2$ und $9,5 \text{ }^\circ/\text{s}$ als kritisch bewertet. Beidseitige Störungen der Hinter-

¹⁸² The RESPONSE 3 development group (2006): Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS, S.16

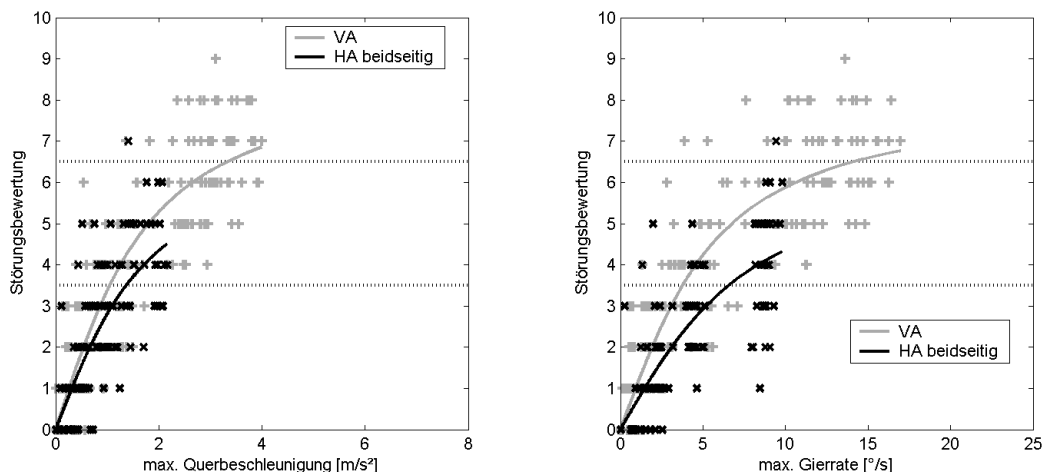


Abbildung 7.3: Störungsbewertung durch das vordere und hintere Lenksystem über der maximalen Querbeschleunigung (links) und der maximalen Gierrate (rechts) in Geradeausfahrt bei 50 km/h.

achse werden von 50 % der Fahrer ab 4,3 m/s² als kritisch eingeschätzt. Die Ausgleichskurve der Gierrate verlässt im Fall der beidseitigen hinteren Störung den unkritischen Bewertungsbereich nicht, obwohl einzelne Störungen bereits als gefährlich bewertet werden.

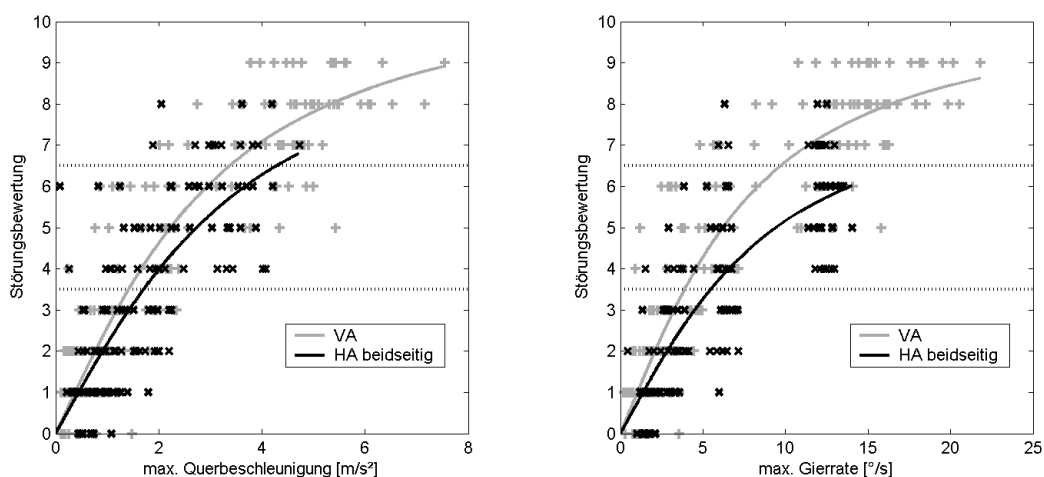


Abbildung 7.4: Störungsbewertung durch das vordere und hintere Lenksystem über der maximalen Querbeschleunigung (links) und der maximalen Gierrate (rechts) in Geradeausfahrt bei 100 km/h.

Der Ergebnisvergleich der beiden Störungsarten für 150 km/h zeigt Abbildung 7.5 (79 Vorderachs- und 55 beidseitige Hinterachsstörungen). Bei dieser Geschwindigkeit zeigen die Ergebnisse im Bereich der Querbeschleunigung einen ähnlichen Verlauf. Störungen durch die Vorderachse werden hier ab 3,6 m/s² im Mittel als gefährlich eingeschätzt, während beidseitige Störungen durch das hintere Lenksystem ab 4 m/s² als gefährlich bewertet werden.

Die Gierrate zeigt hier differenzierter, dass die Vorderachsstörung bereits ab 8 °/s von 50 % der Fahrer kritisch bewertet wird. Wird die Störung von beiden Hinterrädern verursacht, wird die Störung im Mittel erst ab 11 °/s als kritisch eingeschätzt.

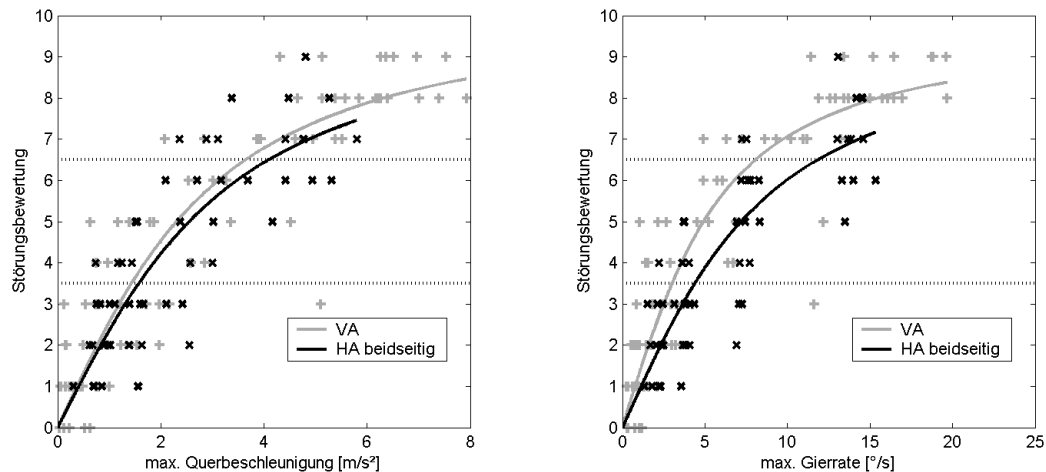


Abbildung 7.5: Störungsbewertung durch das vordere und hintere Lenksystem über der maximalen Querbeschleunigung (links) und der maximalen Gierrate (rechts) in Geradeausfahrt bei 150 km/h.

Die Abbildungen 7.3 bis 7.5 zeigen, dass die Ausgleichskurve der Vorderachsstörung durch kleinere maximale Querbeschleunigung und Gierrate beschrieben wird. Die Abbildungen zeigen, dass auch im Probandenversuch für die Kennwerte der maximalen Querbeschleunigung eine geringere Unterscheidung als für die Kennwerte der maximalen Gierrate besteht (vgl. Abbildung 4.5, S. 30). Auch zeigt der Vergleich der tolerierten maximalen Querbeschleunigung und Gierrate zwischen Störungen des vorderen Lenksystems und beidseitige Störungen der Hinterachse, dass die experimentell ermittelbaren Grenzen für beidseitige Störungen der Hinterachse größer sind, als die der Vorderachse. Zur Prüfung der aufgestellten Hypothese

„Betragsgleiche irreversible Störungen des hinteren Lenksystems (beide Aktoren gleicher Störnenkwinkel) werden in Geradeausfahrt vom Fahrer kritischer bewertet als eine Störung des vorderen Lenksystems“

werden für die untersuchten Geschwindigkeiten die Fahrerbewertungen betragsgleicher Störung¹⁸³ mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test verglichen. Der Test erfolgt direkt anhand der beiden Bewertungsverteilungen, um ein Verschleifen durch die Ausgleichsfunktion zu vermeiden. Die Nullhypothese (H_0) des Tests behauptet, dass beide Bewertungen gleich oder die beidseitige Störung unkritischer ist, während die gerichtete Alternativhypothese (H_1) hier eine kritischere Bewertung für beidseitige Störungen durch das hintere Lenksystem postuliert. Die Ergebnisse in Tabelle 7.1 zeigen für alle Geschwindigkeiten, dass die Annahme einer kritischeren Bewertung bei gleichen Störungen der Fahrdynamik nicht nachgewiesen werden kann. Das Ergebnis ist dabei unabhängig von der Wahl der Limitierung. Die Wahl eines anderen als des hier gewählten 5 %-Signifikanzniveaus hat keinen Einfluss, da das Signifikanzniveau zur Annahme der Alternativhypothese deutlich über 10 % erhöht werden müsste,

183 Gleiche Störungen werden hier anhand des Betrags der maximalen Querbeschleunigung oder der maximalen Gierrate ermittelt. Dabei werden für Störaufschaltungen der Vorderachse nur Störungen ausgewählt, deren Betrag der maximalen Querbeschleunigung (maximale Gierrate) nicht größer als der größte Betrag der maximalen Querbeschleunigung (maximale Gierrate) durch eine beidseitige Störung der Hinterachse ist.

wie die Testwerte (P-Wert¹⁸⁴ in Tabelle 7.1) zeigen. Der geringe Unterschied der Fahrerbewertungen wird zusätzlich durch die größte Differenz der kumulierten Verteilungsdichtefunktionen der Fahrerbewertungen (vierte und siebte Spalte in Tabelle 7.1) dokumentiert, die der Kolmogorow-Smirnow-Test als ein wesentliches Entscheidungskriterium für die Unterschiedlichkeitsbewertung heranzieht. Die in der Tabelle dokumentierten größten Differenzen zwischen den Bewertungsverteilungen sind für eine sichere Unterscheidung der Störungsbewertungen zwischen Störungen an der Vorderachse und beidseitigen Störungen an der Hinterachse zu gering.

v [km/h]	Betragsgleichheit Querbesehleunigung			Betragsgleichheit Gierrate		
	H_{akzept}	P [%]	$\ F_1(x) - F_2(x)\ _{ay}$	H_{akzept}	P [%]	$\ F_1(x) - F_2(x)\ _{\psi}$
50	H_0	59,7	0,06	H_0	27,2	0,10
100	H_0	16,4	0,11	H_0	30,7	0,09
150	H_0	20,8	0,15	H_0	80,8	0,06

Die Ablehnung der Alternativhypothese des Bewertungsvergleichs belegt statistisch nicht gleichzeitig die Richtigkeit der Nullhypothese.¹⁸⁵ Eine Aussage, ob die Bewertungen gleich sind, kann mit diesen Ergebnissen nicht erbracht werden.

Zur Prüfung der unterschiedlichen Kritikalität einer betragsgleichen Störungsreaktion durch das hintere oder das vordere Lenksystem, kann daher die folgende Aussage getroffen werden:

- Für alle Untersuchungsgeschwindigkeiten (50, 100 und 150 km/h) kann die Hypothese einer kritischeren Bewertung im Fall von irreversiblen Störungen durch das hintere Lenksystem nicht falsifiziert werden. Durch die Versuche konnte der Nachweis einer kritischeren Bewertung einer betragsgleichen beidseitigen Störung des hinteren Lenksystems im Vergleich zum vorderen Lenksystem nicht erbracht werden. Es kann daher von einer gleichen oder weniger kritischen Bewertung ausgegangen werden.

Bei der hier vorliegenden Limitierung des hinteren Radlenkwinkels und des statistisch zurückgewiesenen Unterschieds zwischen der Störungsbewertung der Vorderachse und der beidseitigen Störung der Hinterachse ist die maximale Querbesehleunigung als einflussreichster Kennwert prädestiniert, da sie im Gegensatz zur maximalen Gierrate nur eine geringe Differenzierung der beiden Störungsarten aufweist (vgl. Abbildung 4.5). Der Kennwert der maximalen Querbesehleunigung scheint damit den misslungenen Nachweis der Be-

184 Der P-Wert ist ein errechneter Wert der Teststatistik. Er gibt die bedingte Wahrscheinlichkeit an, dass der errechnete Wert der Teststatistik den Ermittelten oder einen noch extremeren Wert besitzt, unter der Annahme, dass die Nullhypothese Gültigkeit hat. Je kleiner der P-Wert ist desto eher kann die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese verworfen werden.

185 Bortz, Weber (2005): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 118

wertungsunterschiede zwischen Störungen der Vorderachse und beidseitiger Störung der Hinterachse zu begründen. Mit Hinblick auf den begrenzten Radlenkwinkel der Hinterachse und der damit verbundenen Einschränkung des Bereichs gleicher Störungen wird die maximale Querschleunigung hier als Kennwert nicht weiter verfolgt. Stattdessen erscheint die maximale Gierrate als Kennwert zur Objektivierung der Störung der Fahrzeugbewegung sehr viel aussichtsreicher, da in den Abbildungen 7.3, 7.4 und 7.5 das 50 %-Quantil eine Differenzierung aufzeigt und der Kennwert auch aus analytischer Sicht (vgl. Abbildung 4.5) eine deutlichere Differenzierung der beiden Störungsarten aufweist.

Aus den Bewertungen der Störungen kann ein Störungsbetrag der Querschleunigung und Gierrate ermittelt werden, ab dem Fahrer eine Störung als gefährlich einschätzen. Die Abbildung 7.6 zeigt exemplarisch dazu die kumulierten Häufigkeiten der von den Fahrern tolerierten Störungen (mit einer Störungsbewertung 1 bis 6) für die maximale Querschleunigung und maximale Gierrate.

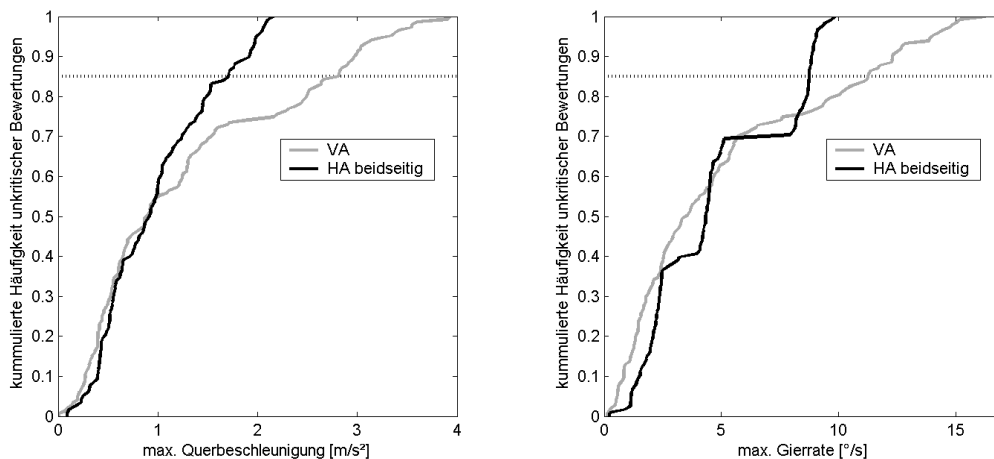


Abbildung 7.6: Kumulierte Häufigkeit nicht gefährlicher Bewertungen einer beidseitigen Störung durch die Hinterachse und einer Störung durch die Vorderachse bei 50 km/h.

In Anlehnung an den Code of Practice wird daher der Grenzwert ermittelt, dem 85 % der Bewertungen eine tolerierte Störung der Fahrzeugbewegung zugewiesen haben. Aus der Summe aller tolerierten Störungen liefert das 85 %-Quantil die maximal tolerierte Querschleunigung und Gierrate. Für 50 km/h wird aus Abbildung 7.6 für Störungen der Vorderachse eine tolerierte Querschleunigung von 2,8 m/s² und für die beidseitige Störung von 1,7 m/s² ermittelt. Die tolerierte maximale Gierrate beträgt 11,3 °/s für Störungen durch die Vorderachse und 8,7 °/s für eine beidseitige Störung der Hinterachse. Für die Geschwindigkeiten von 100 und 150 km/h sind die Abbildungen im Anhang (Abbildung 10.13 und Abbildung 10.14) dargestellt. In Tabelle 7.2 sind die maximal tolerierten Querschleunigungen und Gierraten aller untersuchten Geschwindigkeiten angegeben.

Die tolerierten Störungen der Vorderachse werden im Intervall von 2,3 bis 2,8 m/s² maximaler Querschleunigung ermittelt. Eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit kann nicht plausibel aufgezeigt werden. Für die maximale Gierrate der tolerierten Störungen (untere

	Vorderachse			Hinterachse (beidseitig)		
Geschwindigkeit [km/h]	50	100	150	50	100	150
max. Querbesehleunigungen [m/s ²]	2,8	2,3	2,5	2,2*	2,8	3,0
max. Gierrate [°/s]	11,3	6,6	5,3	10*	12,0	7,8

Zeile der Tabelle 7.2) wird in der Tendenz eine umgekehrte Abhängigkeit zur Geschwindigkeit identifiziert. Im Vergleich zur vorderen Störung weist die beidseitige Störung der Hinterachse bei vergleichbarer Geschwindigkeit höhere tolerierte Querbesehleunigungen und Gierraten auf. Einzige Ausnahme ist die tolerierte Querbesehleunigung bei 150 km/h, die mit der Geschwindigkeit auf 3,0 m/s² gegenüber 2,8 m/s² bei 100 km/h zunimmt. Die ermittelten Grenzen für eine beidseitige Störung bei 50 km/h sind nur eingeschränkt belastbar, da während der Versuche nur eine gefährliche Bewertung registriert werden konnte. Für die Grenzwerte wurden hier die maximal erreichten Störungen herangezogen (100 %-Quantil). Es kann davon ausgegangen werden, dass die wahre tolerierte Gierstörung größer als 10 °/s ist, wenn der Anteil kritisch bewerteter Störungen durch eine beidseitige Störung bei 50 km/h höher ist. Für 50 km/h wird im Vergleich zur Vorderachsstörung erwartet, dass auch mit Wahl größere Störwinkel an der Hinterachse geringere maximale Gierraten bei nicht gefährlicher Bewertungen identifiziert werden können.

7.5 Beidseitige und einseitige Störungen durch das hintere Lenksystem

Die Auswahl des Aktorkonzepts einer Hinterachslenkung wird durch den möglichen Bauraum für die Aktoren stark beeinflusst. In Abhängigkeit der konstruktiven Randbedingungen können zur Anlenkung der Hinterräder zwei Aktorkonzepte gewählt werden. In einem Konzept wird zwischen den Hinterrädern eine gemeinsame Spurstange zur Anlenkung der Hinterräder eingesetzt. Zur Anlenkung kann ein gemeinsamer Aktor verwendet werden. Eine Störung hat in diesem Konzept auf beide Räder eine Auswirkung. Lassen die Randbedingungen keine durchgehende Spurstange zu, übernimmt ein separater Aktor für jedes Hinterrad die Anlenkung. Eine Störung in diesem Konzept hat nur noch auf ein Rad eine direkte Auswirkung.

Um den Einfluss der Aktorkonzepte auf die Kontrollierbarkeit im Fall einer Störung zu überprüfen, wird die Hypothese

„Betragsgleiche Störungen der Fahrzeugbewegung durch beide Hinterräder (symmetrische Störung – beide Aktoren) oder ein Hinterrad (asymmetrische Störung eines Aktors - doppelter Störwinkel in Radnachspur) werden in Geradeausfahrt vom Fahrer kritischer bewertet, wenn die Störung von einem Hinterrad verursacht wird.“

aufgestellt.

Die Prüfung des Hypotheseninhalts erfolgt durch einen Vergleich der beiden Störungsarten für die Geschwindigkeiten von 50 km/h (99 einseitige Störungen), 100 km/h (101 einseitige Störungen) und 150 km/h (38 einseitige Störungen). Die Abbildungen 7.7 bis 7.11 zeigen die Störungsbewertungen in Abhängigkeit der objektiven Größen, maximale Querbeschleunigung und maximale Gierrate. Eine einseitige Störung wird im Versuch durch einen Störtenkwinkel des rechten Hinterrads in Nachspur mit doppeltem Störtenkwinkel (verglichen mit der beidseitigen Störung) dargestellt, um eine ähnlich große Störung der Fahrzeugbewegung durch ein Rad im Versuch sicherstellen zu können (siehe dazu Abbildungen 7.8 und 7.10). Die im Versuch darstellbare Störung ist durch die Limitierung der Radlenkwinkels an der Hinterachse bei beidseitigen Störungen größer.

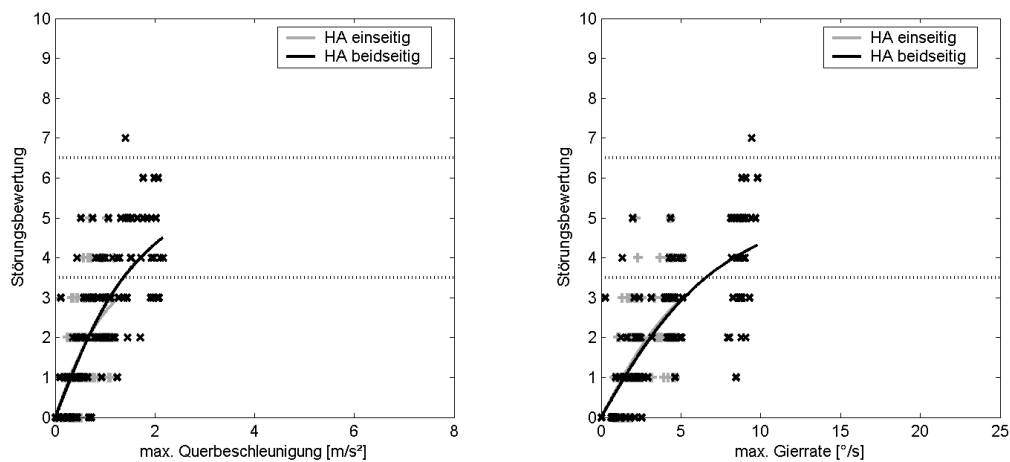


Abbildung 7.7: Störungsbewertung der einseitigen und beidseitigen Störungen des hintere Lenksystems über der maximalen Querbeschleunigung (links) und der maximalen Gierrate (rechts) in Geradeausfahrt bei 50 km/h (die Ausgleichskurven der einseitigen und beidseitigen Störung liegen im linken und rechten Diagramm übereinander).

Aus den Störungsbewertungen für 50 km/h (Abbildung 7.7) kann eine unterschiedliche Störungsbewertung nicht erkannt werden. Für keine im Versuch dargestellte einseitige Störung wird von den Fahrern eine gefährliche Störung bestätigt. Nur für eine beidseitige Störung der Hinterachse wird der tolerierte Bereich der Störungsbewertung knapp verlassen. Die Abbildung zeigt auch, dass durch eine beidseitige Störung der Hinterachse eine größere fahrdynamische Störung als durch eine einseitige Störung erreicht werden kann.

Die größere Störung der Fahrzeugbewegung durch die beidseitigen Störungen der Hinterachse kann nicht auf die Art der Störung zurückgeführt werden, sondern ist in der größeren Achsquerkraft bei maximalem Störtenkwinkel an beiden Hinterrädern begründet. Abbildung 7.8 zeigt die fahrerunabhängigen Störungsauswirkungen einseitiger und beidseitiger Störungen an der Hinterachse im Open-Loop Versuch bei fixiertem Lenkrad von insgesamt 301 beidseitigen Störungen und 140 einseitigen Störungen in Geradeausfahrt. Aus den Abbildungen der maximalen Querbeschleunigung und der maximalen Gierrate über dem

Störtenkwinkel kann für beide Störungsarten der proportionale Zusammenhang zwischen der

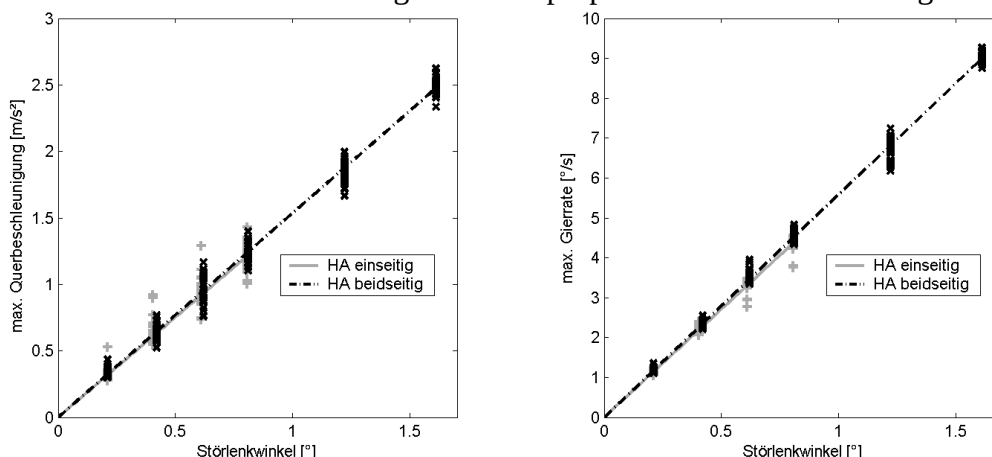


Abbildung 7.8: Störungsauswirkung (maximale Querbeschleunigung links, maximale Gierrate rechts) im Open-Loop Versuch mit fixiertem Lenkrad bei 50 km/h (für einseitige Störung ist der halbe Störtenkwinkel auf der Abszisse aufgetragen).

Bewegungsstörung und dem Störtenkwinkel entnommen werden. In der Abbildung 7.8 ist zu beachten, dass auf der Abszisse der halbe Störtenkwinkel der einseitigen Störung aufgetragen ist, um einen störauswirkungsbezogenen Vergleich grafisch darzustellen. Der aufgeschaltete Störtenkwinkel wird analog zum Closed-Loop-Versuch als Sprung mit einer Rampensteigung von 26 °/s Radlenkwinkeländerung aufgeschaltet.

Für eine Untersuchungsgeschwindigkeit von 100 km/h werden auch für die einseitige Störung gefährlich bewertete Störungen dokumentiert (Abbildung 7.9). Auch bei dieser Geschwindigkeit können durch eine beidseitige Störung größere fahrdynamische Störungen erreicht werden. Im gemeinsam überstrichenen Störungsbereich können die beiden Störungen nicht sicher unterschieden werden.

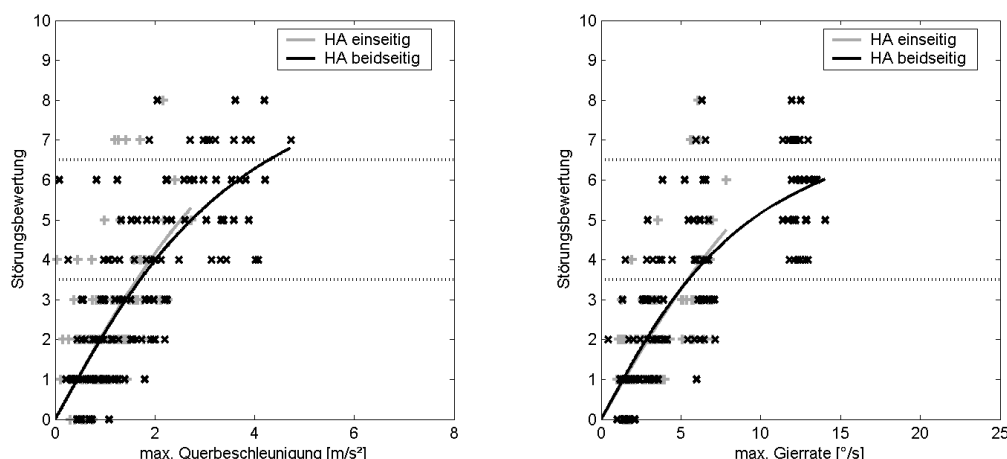


Abbildung 7.9: Störungsbewertung der einseitigen und beidseitigen Störungen des hintere Lenksystems über der maximalen Querbeschleunigung (links) und der maximalen Gierrate (rechts) in Geradeausfahrt bei 100 km/h.

Wie auch bei den vorangegangenen Versuchen weisen auch hier die beidseitigen Störungen eine größere Störung der Fahrzeugbewegung auf. Durchgeführte fixed-control Open-Loop

Versuche zeigen, dass die unterschiedlichen Störauswirkungen kaum auf die Störungsart zurückgeführt werden können. Aus den 216 beidseitigen und 131 einseitigen Störungen wird auch für diese Geschwindigkeit ein gleiches Proportionalitätsverhältnis zwischen Störungs- auswirkung und Störwinkel für beide Störungsarten ermittelt (Abbildung 7.10).

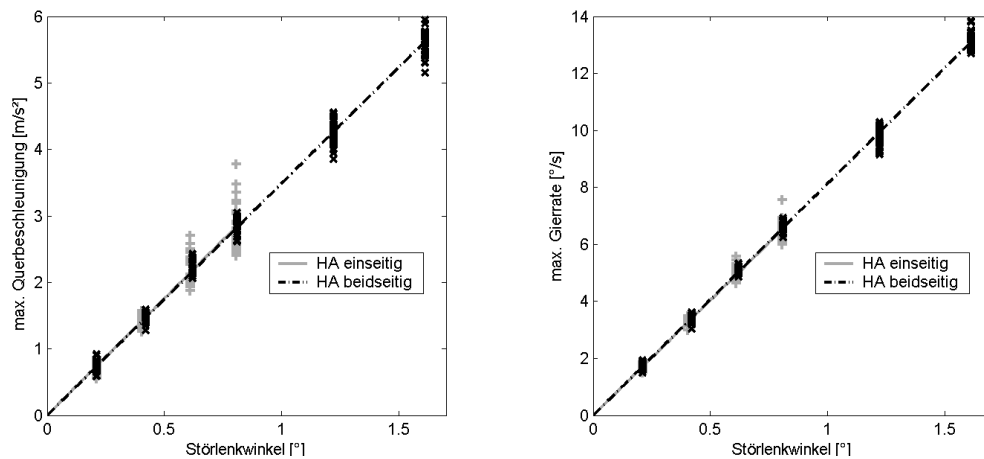


Abbildung 7.10: Störungs- auswirkung (maximale Querb- beschleunigung links, maximale Gierrate rechts) im Open-Loop Versuch mit fixiertem Lenkrad bei 100 km/h (für einseitige Störung ist der halbe Stör- lenkwinkel auf der Abszisse aufgetragen).

Auch bei einer Geschwindigkeit von 150 km/h wird durch die beidseitige Störung eine höhere Störung der Fahrdynamik erreicht (Abbildung 7.11). Für die Bewertungen der einseitigen Störungen können keine Störungsbewertungen im gefährlichen Bereich dokumentiert werden, auch wenn die maximale Querb- beschleunigung und Gierrate vergleichbar zur Störung bei 100 km/h ist.

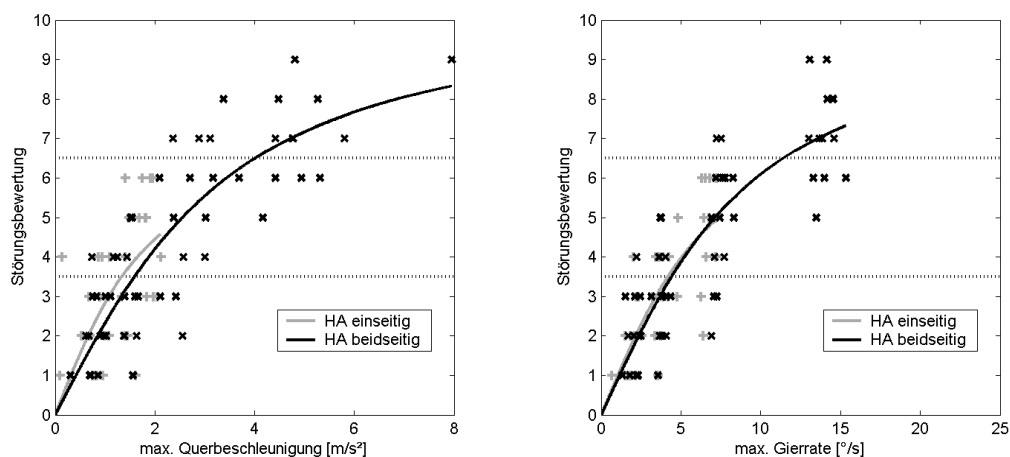


Abbildung 7.11: Störungsbewertung der einseitigen und beidseitigen Störungen des hinteren Lenksystems über der maximalen Querb- beschleunigung (links) und der maximalen Gierrate (rechts) in Geradeausfahrt bei 150 km/h.

Die in den Closed-Loop Versuchen auftretenden störungsinduzierten maximalen Querbeschleunigungen und Gierraten betragen nur rund die Hälfte der im Fall der beidseitigen Störung auftretenden Bewegungsmaxima, obwohl durch die Wahl der Störtenkwinkel eine vergleichbare Störkraftaufschaltung an der Hinterachse sichergestellt ist (vgl. Abbildungen 7.8 und 7.10).

Die Prüfung einer unterschiedlichen Störungsbewertung von zweiseitigen und einseitigen Störungen in Geradeausfahrt wird anhand des Ergebnisses des Kolmogorow-Smirnow-Tests durchgeführt. Der Test geht hier von der gerichteten Alternativhypothese aus, dass die Störungsbewertungen der einseitigen Störung kritischer bewertet werden als betragsgleiche beidseitige Störungen. Die Nullhypothese nimmt dann an, dass beide Störungen gleich bewertet werden oder der einseitige Test unkritischer ist. Für ein Signifikanzniveau von 5 % wird für alle Geschwindigkeiten die Nullhypothese beibehalten (siehe Tabelle 7.3). Einseitige Störungen werden in Geradeausfahrt bei gleicher Störungsreaktion von den Fahrern nicht signifikant kritischer bewertet. Eine Diskussion zur Höhe¹⁸⁶ des Signifikanzniveaus muss hier nicht geführt werden, da die Höhe der zur Ablehnung der Nullhypothese notwendiger Signifikanzgrenze mindestens 27 % betragen müsste, was wissenschaftlich nicht gerechtfertigt ist.

v [km/h]	Betragsgleichheit Querbewegung			Betragsgleichheit Gierrate		
	H_{akzept}	P [%]	$\ F_1(x) - F_2(x)\ _{ay}$	H_{akzept}	P [%]	$\ F_1(x) - F_2(x)\ _{\psi}$
50	H_0	90,3	0,03	H_0	90,3	0,03
100	H_0	26,5	0,11	H_0	60,4	0,07
150	H_0	98,9	0,02	H_0	96,0	0,03

Zur Prüfung der Hypothesenaussage werden die Ergebnisse des Bewertungsvergleichs und die Aussagen der objektiven Kennwerte gegenübergestellt. Für einen Bereich gleicher Störung der Fahrzeugbewegung kann kein signifikanter Unterschied der Störungsbewertungen ermittelt werden. Beidseitige Störungen rufen im Vergleich zu einseitigen Störungen an der Hinterachse größere Störungen der Fahrzeugbewegung und damit auch kritischere Bewertungen hervor. Für die Prüfung der Hypothese ergeben sich die folgenden Aussagen:

- Einseitige Störungen der Hinterachse werden von normal geübten Fahrern nicht kritischer als beidseitige betragsgleiche Störungen bewertet.
- Die Störungsbewertungen sind unabhängig von der Geschwindigkeit.

¹⁸⁶ Die Wahl des Signifikanzniveaus wird von den Randbedingungen (z. B. der Verkehrssicherheit) mitbestimmt. Eine Prüfung zu anderen Niveaus (wie z. B. 0,1 %, 1 % oder 10 %) wäre möglich. Mit der Wahl noch größerer Signifikanzniveaus könnte eine Nullhypothese zugunsten einer Alternativhypothese verworfen werden, was sich hier aber aufgrund der sehr großen notwendigen Signifikanzniveaus verbietet.

Für die zu prüfende Hypothese ergibt sich daher kein Hinweis, dass einseitige Störungen in Geradeausfahrt kritischer bewertet werden als beidseitige Störungen.

Eine Identifikation von noch tolerierten Störungen ist aus den hier erhobenen Daten nicht möglich, da in den Geschwindigkeitsbereichen von 50 und 150 km/h keine Bewertungen im gefährlichen Bereich dokumentiert sind. Nur für eine Geschwindigkeit von 100 km/h sind wenige Störungen von den Fahrern als gefährlich bewertet worden, wie die Abbildung 7.9 zeigt. Eine belastbare Aussage kann aufgrund dieser Daten nicht gemacht werden, jedoch geben die Bewertungen hier den Hinweis, dass eine bei dieser Geschwindigkeit aufgebrachte Störung der Fahrzeugbewegung bereits als gefährliche Störung bewertet werden kann.

7.6 Beidseitige Störungen durch das hintere Lenksystem in Kurvenfahrt

Der Einfluss einer überlagerten stationären Querkraft und Drehrate auf die Störungsbewertung eines Störlenkwinkels beide Hinterräder wird durch den Vergleich identischer Störungen in Kurvenfahrt und Geradeausfahrt aufgezeigt, der zur Prüfung der Hypothese

„Symmetrische Störungen der Hinterachse werden in Kurvenfahrten vom Fahrer kritischer bewertet als identische Störungen in Geradeausfahrt.“

motiviert wird. Abbildung 7.12 zeigt für beidseitige Störungen des hinteren Lenksystems die Störungsbewertung in Abhängigkeit der maximalen Querbeschleunigung und Gierrate in Geradeaus- und Kurvenfahrt. Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass bei Kurvenfahrt größere Streuungen der Störung der Fahrzeugbewegung hervorgerufen werden als in Geradeausfahrt. Die in der Abbildung 7.12 angegebene maximale Querbeschleunigung und Gierrate der Kurvenfahrt sind um ihre stationären Anteile korrigiert, sodass eine Vergleichbarkeit der Bewegungsstörung anhand der Abbildung möglich ist. Für die Interpretation der Objektivwerte muss berücksichtigt werden, dass eine Störungsaufschaltung in Kurvenfahrt stets nach kurvenaußen erfolgt, da der Abbau der Achs-Querkraft eine größere Störung der Fahrzeugbewegung hervorruft als der (im Vergleich zum Abbau langsame) Querkraftaufbau. Die ausschließliche Untersuchung der größeren Störungsreaktion wird mit Hinblick auf den Worst-Case Charakter des Szenarios getroffen.

Die Unterschiedlichkeit der Bewertung kann auf die Versuchsart zurückgeführt werden. Wie die Abbildung 10.21 im Anhang zeigt, treten in Geradeaus- und Kurvenfahrt vergleichbare Störungen der Fahrzeugbewegung auf. Die Störungen in Kurvenfahrt werden jedoch weniger kritisch von den Probanden bewertet.

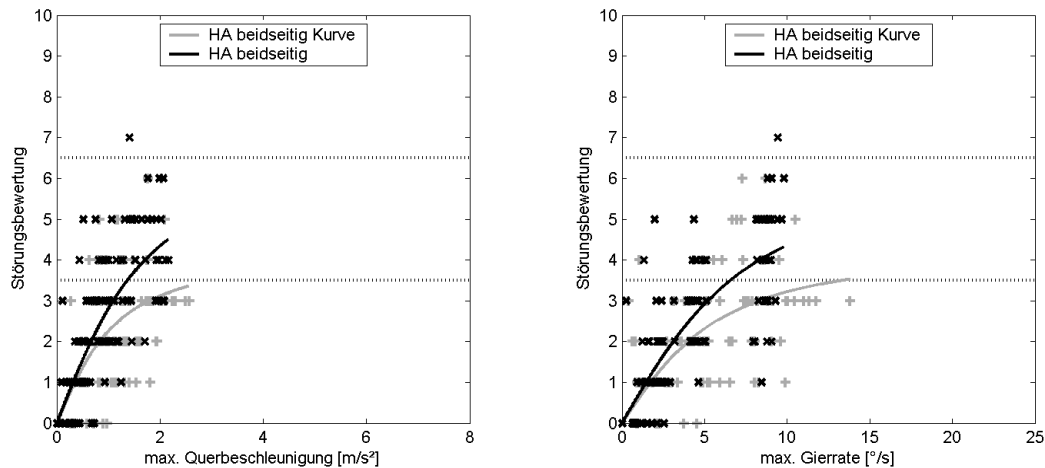


Abbildung 7.12: Störungsbewertung einer beidseitigen Störung durch das hintere Lenksystem in Abhängigkeit der maximalen Querbeschleunigung (links) und der maximalen Gierrate (rechts) in Geradeausfahrt und Kurvenfahrt (bereinigt um stationäre Anteile).

Zur Prüfung der Hypothese wird erneut mit dem Kolmogorow-Smirnow-Tests die Alternativhypothese einer kritischer bewerteten beidseitigen Störung der Hinterachse in Kurvenfahrt gegenüber der Geradeausfahrt geprüft. Die dazu komplementäre Nullhypothese geht von einer gleichen Bewertung oder unkritischeren Bewertung in Kurvenfahrt aus. Das Ergebnis des Tests zeigt Tabelle 7.4.

v [km/h]	Betragsgleichheit Querbeschleunigung			Betragsgleichheit Gierrate		
	H_{akzept}	P [%]	$\ F_1(x) - F_2(x)\ _{ay}$	H_{akzept}	P [%]	$\ F_1(x) - F_2(x)\ _{\psi}$
50	H_0	42,2	0,09	H_0	44,1	0,09

Das Testergebnis kann für das hier angenommene Signifikanzniveau von 5 % für betragsgleiche relative Änderungen der Fahrzeugbewegung keine kritischere Bewertung beidseitiger Störungen in Kurvenfahrt nachweisen, obwohl in Kurvenfahrt absolut größere Querbeschleunigung und Gierraten vorliegen. Ein Einfluss der bei der Kurvenfahrt von 50 km/h vorliegenden stationären Kräfte auf die Störungsbewertung der Fahrer ist durch diese Versuche nicht nachweisbar. Durch den Vergleich der beidseitigen Störung in Geradeaus- und Kurvenfahrt ergibt sich auch ein Hinweis auf die geringere Sensibilität der Fahrer bezüglich der Störungen in Kurvenfahrten. Zusammen mit den objektiven Werten aus Abbildung 7.12 kann die folgende Aussage getroffen werden:

- Eine beidseitige relative Störung des hinteren Lenksystems wird in Kurvenfahrt nicht signifikant kritischer bewertet als eine vergleichbare beidseitige Störung in Geradeausfahrt.

Für die Hypothese zur Kritikalität der beidseitigen Störung durch das hintere Lenksystem in Kurven- und Geradeausfahrt bedeutet dieses Ergebnis, dass die Hypothese einer kritischeren Bewertung in Kurvenfahrt nicht falsifiziert werden kann. Ein signifikanter Bewertungsunterschied kann durch die hier erhobenen Störungsbewertungen nicht nachgewiesen werden.

7.7 Einseitige Störungen durch das hintere Lenksystem in Kurvenfahrt

Die Größe einer einseitigen Störung im Fall einer radindividuellen Aktoranordnung ist, neben anderen Parametern, auch von der Vertikalkraft des mit dem Störlenkwinkel beaufschlagten Rades abhängig. Ein kurvenäußeres Rad bringt in einer Kurvenfahrt durch die Radlastverlagerung im Vergleich zu dem kurveninneren Rad einen größeren Anteil der Zentripetalkräfte auf. Ein Störlenkwinkel an einem kurvenäußeren Rad kann durch das nicht angelenkte und entlastete kurveninnere Rad nur unvollständig kompensiert werden. Die zu prüfende Hypothese zum Vergleich der Störungen lautet daher:

„Einseitige Störungen der Hinterachse werden in Kurvenfahrten vom Fahrer kritischer bewertet als identische Störungen in Geradeausfahrt.“

Die Prüfung der Hypothese erfolgt anhand der in der Kurvenfahrt und Geradeausfahrt erhobenen Daten bei 50 km/h. In Abbildung 7.13 sind die Störungsbewertungen beider Versuche über der störungsinduzierten maximalen Querbewegung und Gierrate dargestellt. Die Daten der Kurvenfahrt sind um ihre stationären Anteile bereinigt, sodass ein Vergleich der Bewertungen in Abhängigkeit der Bewegungsstörung auch hier erleichtert wird. Die Diagramme zeigen, dass die im Versuch auftretenden Störungsreaktionen von den Fahrern annähernd gleich bewertet werden, obwohl in der Kurvenfahrt größere Störungen der Fahrzeugbewegung erreicht werden als in Geradeausfahrt (siehe auch Abbildung 10.22, S. 128).

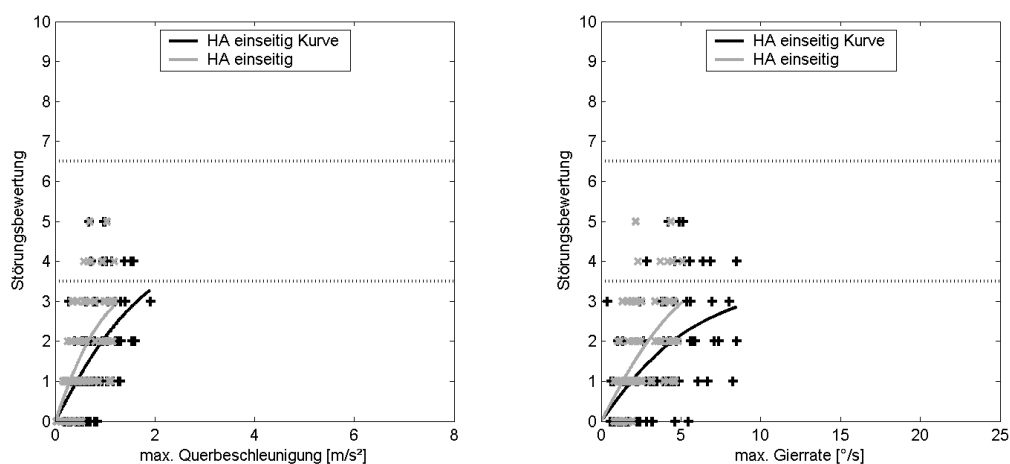


Abbildung 7.13: Störungsbewertung einer einseitigen Störung durch das hintere Lenksystem in Abhängigkeit der maximalen Querbewegung (links) und der maximalen Gierrate (rechts) in Geradeausfahrt und Kurvenfahrt.

Der statistische Vergleich der Störungsbewertungen betragsgleicher Störungen ist in Tabelle 7.5 wiedergegeben. Entsprechend der Hypothese wurde mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test

eine kritischere Störungsbewertung in Kurvenfahrt alternativ zu einer gleichen oder weniger kritischen Störungsbewertung in Kurvenfahrt getestet.

v [km/h]	Betragsgleichheit Querbewegung			Betragsgleichheit Gierrate		
	H_{akzept}	P [%]	$\ F_1(x) - F_2(x)\ _{ay}$	H_{akzept}	P [%]	$\ F_1(x) - F_2(x)\ _{\psi}$
50	H_0	29,7	0,12	H_0	9,0	0,18

Aus den Ergebnissen der Störungsbewertung können für die hier zu prüfende Hypothese die folgenden Aussagen getroffen werden:

- Einseitige relative Störungen werden in Kurvenfahrt nicht signifikant kritischer bewertet als vergleichbare einseitige Störungen in Geradeausfahrt.
- Keine der in Kurvenfahrt erhobenen Störungsbewertungen wird von den Fahrern als gefährlich eingeschätzt.

Aus dem Testergebnis kann nicht abgeleitet werden, dass normal geübte Fahrer betragsgleiche Störungen des kurvenäußeren Hinterrades unabhängig von einer überlagerten stationären Querbewegung und Gierrate bewerten. Für die Bearbeitung der aufgestellten Hypothese bedeuten diese Testergebnisse, dass die Hypothese zur kritischeren Bewertung einer einseitigen Störung in Kurvenfahrt nicht falsifiziert werden kann.

7.8 Güte der Störungsuntersuchung

Die drei Kriterien Objektivität, Reliabilität und Validität zur Quantifizierung der Güte empirischer Untersuchungen wurden bereits bei der Planung der Versuche berücksichtigt. Durch eine dokumentierte Durchführung der Versuche und einen weitgehenden Verzicht auf individuelle Ermittlung der objektiven Kriterien wird ein größtmögliches Maß an Objektivität erreicht.

Die Reliabilität der Störungsversuche wird durch Retest der Störungen bestimmt. In den Störungsversuchen sind zwei Störungen im einseitigen Blindversuch wiederholt getestet worden. Die Bewertung des Erst- und Retests werden durch den Kolmogorow-Smirnow-Test auf unterschiedliche Bewertungsverteilungen getestet (siehe Tabelle 7.6). Das Testergebnis zeigt, dass in allen Versuchen identische Störwinkel nicht signifikant unterschiedlich bewertet werden. Die Wahl einer für Intervalldaten üblichen Testmethode (t-Test) liefert eine noch deutlichere Aussage zur Übereinstimmung der Bewertungen, sodass davon ausgegangen wird, dass das eingesetzte Verfahren alle wesentlichen Merkmale zur Bewertung einer Störungsreaktion erfasst. Aufgrund der Testergebnisse wird von einer hohen Reliabilität der Versuche ausgegangen.

v [km/h]	H_{akzept}	P [%]	n	$\ F_1(x) - F_2(x)\ $
50	H_0	40,5	66	0,15
100	H_0	99,8	57	0,07
150	H_0	100,0	25	0,08
50 Kurve	H_0	100,0	68	0,05

Die interne Validität des Tests wird durch eine Varianzanalyse geprüft. Dabei wird der Störlenkwinkel als unabhängige Variable und die Störungsbewertung als abhängige Variable eingesetzt und damit die Ursachen-Wirkungskette erfasst. Das Ergebnis der Analyse zeigt, dass für die unterschiedlichen Störungsarten (Vorderachse, beidseitige Störung und einseitige Störung der Hinterachse) ein direkter Zusammenhang zwischen Störlenkwinkel und Störungsbewertung besteht. Aufgrund des Ergebnisses kann daher von einer sehr hohen internen Validität ausgegangen werden.

Die externe Validität der Untersuchung der Störung kann nur für Störungen durch das vordere Lenksystem aufgezeigt werden. Die bisher publizierte Werte¹⁸⁷ zeigen, dass die in dieser Arbeit ermittelten mittleren Bewertungen infolge von Störungen durch das vordere Lenksystem insgesamt weniger kritisch bewertet werden. Die aus den hier durchgeführten Versuchen ermittelten Querbeschleunigungen an der Gefährlichkeitsgrenze sind nur annähernd unabhängig von der Geschwindigkeit (vgl. Abbildung 7.3 bis 7.5) und weisen Querbeschleunigungen von 3,3 bis 3,6 m/s² auf, während Neukum et al. eine konstante Querbeschleunigung von 2,9 m/s² ermittelt. Die maximalen Gierraten liegen ebenfalls in diesen Versuchen höher; für 100 und 150 km/h werden hier 9,7 bzw. 8 °/s maximale Gierrate ermittelt, während Neukum et al. 7 und 5 °/s für die gleichen Geschwindigkeiten angibt.

Eine externe Validität kann damit für die Störungen des vorderen Lenksystems nur begrenzt aufgezeigt werden. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Wahl eines identischen Versuchsdesigns nicht gleiche Ergebnisse nach sich zieht, sondern weitere Einflussfaktoren wie z. B. die Probandenauswahl, die Versuchsdurchführung oder Datenaufbereitung Ursache für abweichende Ergebnisse sein können.

7.9 Fazit

Die Ergebnisse zur Systemstörung durch irreversible Störaufschaltungen zeigen eine Zunahme der Störreaktion und der Störungsbewertung mit steigender Geschwindigkeit. Neben der Fahrgeschwindigkeit und der Störwinkelamplitude hat die Fahrerreaktion einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Höhe der dokumentierten Bewegungsstörung des Fahrzeugs. Der

¹⁸⁷ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S.10

Fahrereinfluss entsteht durch die interindividuellen Ankopplungen und Lenkreaktionen der Fahrer unmittelbar auf die Lenkstörung und trägt damit einen (nicht unerheblichen) Anteil der Ergebnisstreuung bei. Für die bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten untersuchten Störungsarten in Geradeausfahrt (Störung an der Vorderachse, beidseitige Störung durch die Hinterachse) zeigt die störungsinduzierte maximale Gierrate eine bessere Differenzierung der Störungen als die störungsinduzierte maximale Querschleunigung. Die im Probandenversuch aufgezeigte bessere Differenzierung der beidseitigen Störung an der Hinterachse und Vorderachse ist damit erwartungskonform zu den Berechnungen des Einspurmodells.

Für die beidseitige Störung durch die Hinterachse können Grenzwerte für 100 und 150 km/h hergeleitet werden, die von 85 % der normal geübten Versuchsteilnehmer als nicht gefährliche Störungsreaktion bewertet werden (siehe Tabelle 7.2). Eine kritischere Bewertung von einseitigen Störwinkelaufschaltungen konnte gegenüber einer beidseitigen Störwinkelaufschaltung an der Hinterachse in der hier untersuchten Fahrzeugkonfiguration nicht nachgewiesen werden. Bei gleicher (theoretischer) Störseitenkraft ($\Delta \delta_{\text{beidseitig}} = 2 \Delta \delta_{\text{einseitig}}$) wird durch eine Störung beider Hinterräder eine größere Störung der Fahrzeugbewegung im Probandenversuch nachgewiesen. Da Vergleichsmessungen ohne Fahrereinfluss (Open-Loop) diesen Unterschied nicht aufzeigen, ist die Ursache in der Fahrerreaktion oder in der Ankopplung des Fahrers zu suchen. Eine sichere Unterscheidung der Ursache ist durch die hier gemachten Versuche nicht möglich.

Ein vermuteter Unterschied der Störungsbewertung von betragsgleichen Störungsreaktionen einer Vorderachs- und beidseitiger Hinterachsstörung konnte mit der hier durchgeführten Anzahl von Stichproben (457 Vorderachs- und 324 Hinterachsstörungen) für keine der untersuchten Geschwindigkeiten nachgewiesen werden. Auch konnte ein Unterschied zwischen betragsgleichen Störreaktionen ein- und beidseitiger Störungen der Hinterachse nicht aufgezeigt werden, sodass der Ort der Störwinkelaufschaltung auf dieser Basis als urteilsbestimmende Einflussgröße wenig wahrscheinlich erscheint. Eine Unterscheidung in anderen Versuchen mit deutlich größerer Stichprobenanzahl kann mit den hier ermittelten Ergebnissen nicht ausgeschlossen werden.

Da für die Störaufschaltungen in Kurvenfahrt weder für einseitige noch für beidseitige Störungen der Hinterachse eine unterschiedliche Bewertung betragsgleicher Störungen im Vergleich zu Geradeausfahrten nachgewiesen werden kann, ist der Nutzen von Störuntersuchungen bei stationärer Kurvenfahrt trotz der stärkeren Wirkung der Störung fraglich. Eine Untersuchung der Störauswirkung erscheint unter diesen Bedingungen derzeit nicht zwingend notwendig, da der versuchstechnische Aufwand gegenüber den Geradeausfahrten deutlich größer ist.

8 Diskussion und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird die Sensitivität und Beanspruchung von Fahrern auf einen Phasenverzug von Querschleunigung und Gierrate sowie die Störauswirkung im Fall einer Lenksystemstörung einer Hinterachslenkung in kontrollierten Feldversuchen untersucht. Aus den Versuchen des Phasenverzugs ergeben sich die folgenden Ergebnisse:

- In Makrosinus- und Spurwechselversuch kann eine Sensitivität der Fahrer auf einen Phasenverzug zwischen Querschleunigung und Gierrate für den in den Versuchen dargestellten Bereich des Phasenverzugs von -42 ms bis 80 ms nicht nachgewiesen werden.
- Der Nachweis, dass eine Verringerung der Phasendifferenz zwischen der Querschleunigung und Gierrate auch zu einer Reduktion der Beanspruchung der Fahrer während der Versuchsdurchführung führt, kann durch die Versuchsergebnisse nicht erbracht werden.

Mit den Versuchen zur Phasendifferenz ist die Erwartung verbunden, dass der Fahrer auf diese Größe sensitiv ist und damit die Phasendifferenz zwischen Querschleunigung und Gierrate bei der Auslegung eines Pkws berücksichtigt werden muss.

Mit dem gewählten Versuch des Makrosinus liegt ein Manöver vor, das den Vorteil einer klaren Darstellung der Phasenunterschiede mit einer hohen Wiederholrate bei gleichzeitig hoher Lenkaktivität und Beanspruchung des Fahrers vereint. Mit dem Fahrspurwechsel wird ein Manöver eingesetzt, das zwar nur eine einzelne Lenkaktivität abbildet, aber eine exakte Spurhaltung nach dem Wechsel erfordert und die Bewertung der Lenkpräzision erleichtert. In beiden Manövern kann der Phasenverzug kontrolliert variiert werden, sodass eine Unterscheidung der in den Versuchen dargestellten Varianten des Phasenverzugs (messtechnisch) möglich ist. Diese Manöver stellen daher für eine Unterscheidung Best-Case Szenarien dar.

Neben der kontrolliert experimentellen Darstellung des Phasenverzugs wird mit einem Paarvergleich ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Fahrzeugreaktionen in kurzer zeitlicher Abfolge ermöglicht und eine Eintrübung des Urteils aus dem ersten Manöver minimiert. Für den Fahrer wird damit eine Basis geschaffen, die unterschiedlichen Fahrzeugreaktionen zu bewerten.

Mögliche Verzerrungen der Bewertungen durch eine dem Fahrkönnen der einzelnen Fahrer zugeschriebene Unterschiedlichkeit (Attributionsfehler), wird durch direkten Hinweis auf die Veränderung des Fahrzeugverhaltens durch technische Eingriffe in die Lenksysteme entgegen gewirkt. Bewertungseffekte durch zu positive oder zu negative Bewertung eines Probanden, z. B. durch die persönliche Einstellung gegenüber der Untersuchung oder den daran beteiligten Personen (Milde-Härte-Fehler¹⁸⁸), wird durch die Anzahl der Probanden ($N = 34$) ein nur ein geringer Einfluss auf das Ergebnis erwartet. Die Versuche werden zusätzlich im ein-

188 Bortz Döring (2006): Forschungsmethoden und Evaluation, S. 185ff

seitigen Blindversuch durchgeführt, sodass sich dem Fahrer keine Möglichkeit bietet, eine Variante der Systemauslegung gezielt besser oder schlechter zu bewerten. Da auch der angebotene Skalenbereich zur Bewertung der Fragen von allen Probanden voll ausgeschöpft wird, kann eine belastbare Begründung für die hohe Varianz der Bewertungen nur schwer gefunden werden. Mit dem Fragebogen werden sowohl Merkmale der variierten Fahrzeugeigenschaften referenziert, wie auch der fahrerinterne Aufwand der Versuchsdurchführung. Da diese Methode¹⁸⁹ bereits erfolgreich eingesetzt wurde, kann der durch die statistischen Tests zurückgewiesene Zusammenhang zwischen der Phasendifferenz und der Bewertung auch durch die Befragungsmethode nicht zufriedenstellend erklärt werden.

Eine mögliche Ursache für die dokumentierte Bewertungsstreuung könnte ein zu geringer Stichprobenumfang sein (da der zu bewertende Effekt möglicherweise zu klein für die gewählte Probandanzahl ist). Eine weitere mögliche Ursache wäre, dass die Sensitivität der Fahrer auf eine Phasendifferenz größer als +80 ms oder kleiner als -42 ms ist. Die möglichen Ursachen können ohne erneute Versuche jedoch nicht gezeigt werden.

Ein weiterer möglicher Grund für die große Streuung der Fahrereinschätzung könnte sein, dass urteilsbestimmende Parameter nicht ausreichend variiert wurden. Als eine urteilsbestimmende Kenngröße wird die Gierverstärkung des Fahrzeugs vermutet, die sich in Versuchen von Fahrzeugen ohne Hinterachslenkung als eine wichtige objektive Kenngröße¹⁹⁰ ausgezeichnet hat, die aber in dieser Arbeit durch eine gleichbleibende Gierverstärkung bewusst ausgeblendet wird. Durch ein verändertes Versuchsdesign könnte bei gleicher Phasendifferenz die Gierverstärkung variiert werden und damit ein leichter wahrnehmbares Merkmal den Fahrern zur Bewertung angeboten werden.

Durch Wahl anderer Versuche, sei es bei einer anderen Geschwindigkeit oder anderen Manövern, ist es jedoch nicht zu erwarten, dass eine höhere Sensitivität auf Zeitverzugsänderung auftritt, wenn dann andere Effekte, wie eine veränderte stationäre Gierverstärkung oder ein anderes Gierdämpfungsverhalten die Wahrnehmung überlagern. Aufgrund der Ergebnisse wird davon ausgegangen, dass andere als die hier kontrollierten Parameter für die Fahrer urteilsbestimmend sind.

Für die Praxis bedeuten die Ergebnisse der Makrosinus- und Spurwechselversuche, dass die Erhöhung der Agilität und Wendigkeit bei niedrigen Geschwindigkeiten oder die Erhöhung der Stabilität bei hohen Geschwindigkeiten weiterhin der Nutzen beim Einsatz einer Hinterachslenkung ist. Die in dieser Arbeit aufgezeigte vernachlässigbare Sensitivität der Fahrer auf die Phasendifferenz als auch der nicht nachweisbare Zusammenhang zwischen Phasendifferenz und Fahrerbeanspruchung bedeutet, dass die Veränderung der Zeitverzugsdifferenz keine Berücksichtigung für die Nutzauslegung finden muss.

Anhand der Störungsversuche können für die Beherrschbarkeit der lenkungsinduzierten Fahrzeugbewegungsstörung die folgenden Erkenntnisse abgeleitet werden:

189 Neukum et al. (2001): Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften

190 vgl. Bisimis et al. (1977): Lenkwinkel-Sprung und Übergangsverhalten von Kraftfahrzeugen, S. 585

- Eine beidseitige irreversible Lenkstörung der Hinterachse wird in Geradeausfahrt nicht kritischer bewertet als eine betragsgleiche Störung der Fahrzeugbewegung durch das vordere Lenksystem.
- Eine kritischere Bewertung durch eine einseitige irreversible Lenkstörung der Hinterachse kann in Geradeausfahrt gegenüber einer betragsgleichen beidseitigen Lenkstörung der Hinterachse nicht nachgewiesen werden.
- Eine unterschiedliche Bewertung der Störungen in Kurvenfahrten kann gegenüber betragsgleichen Störungen in Geradeausfahrt bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h weder für einseitige noch beidseitige Lenkstörungen der Hinterachse nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse zur Beherrschbarkeit gelten, sofern nicht anders angegeben, für Geschwindigkeiten von 50, 100 und 150 km/h.

Die Untersuchung der lenkungsinduzierten Störung der Fahrzeugbewegung wird mit einer bereits mehrfach bewährten Methode durchgeführt. Die eingesetzte Störungsbewertungsskala wird dabei nicht nur zur Bewertung von Störlenkwinkel eingesetzt, sondern auch zur Bewertung der Kontrollierbarkeit der Fahrzeugbewegung durch Störmomentaufschaltungen in elektro-mechanischen Lenksystemen oder von Elektronischen-Stabilitäts-Systemen verursachte Gierstörungen der Fahrzeugbewegung.

Der systembedingte Nachteil, dass das Hinterachslenksystem kleinere Störungen der Fahrzeugbewegung gegenüber dem vorderen Lenksystem aufbringen kann, wird durch eine gemeinsame Untersuchung mit den Störungen des vorderen Lenksystems vermieden. Durch die zufällige Reihenfolge der Störaufschaltung ist es den Fahrern kaum möglich, den Fehlerort vorherzusagen und sich auf die Fehlerauswirkung einzustellen. Eine Vorhersage wird zusätzlich erschwert, da die Störamplituden und Störwinkelrichtungen variiert werden und die Durchführung im einseitigen Blindversuch erfolgt. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Störungen für den Fahrer überraschend innerhalb der Gasse aufgeschaltet werden.

Wie in den Störungsdarstellungen gezeigt ist, liegt eine nicht kleine Streuung der Fahrerurteile vor. Um eine Ausnutzung der Bewertungsskala zu erreichen (Vermeidung von Ceiling und Floor-Effekten), wurde eine der beiden größten Störaufschaltungen als Erstfehler den Probanden dargestellt, umso das obere Ende der Skala mit einer Störreaktion zu verankern. Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine mit zunehmender Störung der Fahrzeugbewegung auch eine zunehmende kritischere Bewertung, was den bereits publizierten Störungsbewertungen nicht widerspricht. Neben der interindividuellen Einschätzung der Kontrollierbarkeit einer Fahrzeugstörung (Urteilsstreuung) hat auch die Ankopplung an das Lenkrad und das Reaktionsmuster des Fahrers einen Einfluss auf die Fahrzeugstörung und damit auch auf die Streuung der Kennwerte von maximaler Querschleunigung und maximaler Gierrate (Kennwertstreuung). Durch die Anzahl der Probanden ($N = 33$) stehen ausreichend Stichproben zur Verfügung, sodass ein Zusammenhang zwischen der maximalen Fahrzeugstörung

und der Bewertung identifiziert werden kann. Da auf eine Kalibrierung der Fahrer durch Übungs-Bewertungsfahrten zugunsten einer unerwarteten Störung verzichtet wird, bildet die dokumentierte Streuung die Bandbreite an Reaktions- und Bewertungsunterschieden des Fahrerkollektivs ab.

Durch die Abhängigkeit der Bewegungsstörung von der Art der Störung (Vorderachse, einseitige- oder beidseitige Störung der Hinterachse) können zur Beantwortung der Hypothesen nur betragsgleiche Störauswirkungen verglichen werden. Die Betragsgleichheit wird an der maximalen Querschleunigung oder Gierrate identifiziert. Der Einfluss auf das Untersuchungsergebnis der zur Identifikation der Betragsgleichheit der Störungen herangezogenen Kennwerte (Querschleunigung oder Gierrate) ist in diesen Versuchen vernachlässigbar. Insgesamt zeigt die störungsinduzierte maximale Gierrate eine bessere Differenzierung der Störungen als die störungsinduzierte maximale Querschleunigung, was den Aussagen der fahrereinflussfreien Modellrechnungen nicht widerspricht.

Ein Bewertungsunterschied zwischen Störungen des vorderen Lenksystems und einer beidseitigen Störung durch das hintere Lenksystem kann durch die Ergebnisse nicht nachgewiesen werden. Für diese Versuche wird das Ergebnis derart interpretiert, dass die Fahrerbewertung unabhängig von dem Ort der eingebrachten Störung ist. Die Rückwirkung der unterschiedlichen Störlenkwinkel von Vorder- oder Hinterachse auf das Abstützmoment am Lenkrad scheint nur eine untergeordnete Bedeutung zu haben. Diese Interpretation widerspricht nicht den Untersuchungsergebnissen, da das Lenkradmoment eine im Vergleich zur störungsinduzierten maximalen Gierrate geringen Erklärungsbeitrag der Bewertung liefert und die maximale Gierreaktion des Fahrzeugs für die Fahrerurteile bestimmend scheint.¹⁹¹

Würde eine Limitierung der hintere Lenkwinkel nicht vorliegen und größere Störungen der Fahrzeugbewegungen durch einen beidseitigen Störlenkwinkel der Hinterachse ermöglicht werden, wäre auch eine andere Interpretation der in dieser Arbeit ermittelten Daten der beidseitigen Störung möglich: Die Störungsbewertung bleibt unterhalb der Störungsbewertung der Vorderachse bei gleicher Störung der Fahrzeugbewegung (vgl. Abbildungen 7.3 und 7.4). Unter der Annahme, dass der Verlauf der 50%-Quantile extrapoliert werden kann, wäre dann eine Bewertung abhängig vom Ort der Störungsaufschaltung. Diese Interpretation kann aber mit den in dieser Arbeit erhobenen Daten nicht gestützt werden.

Die Erwartung, dass eine einseitige Störung, bedingt durch den Fahrereinfluss größere Störungen hervorrufen und damit von Fahrern gefährlicher eingeschätzt werden, kann nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass der Unterschied zwischen den Bewertungen der beiden Störungsarten vernachlässigt werden kann, dass aber im Fall einer beidseitigen Störung größere Störreaktionen hervorgerufen werden können.

Aufgrund der Ergebnisse der Störungsuntersuchung einseitiger und beidseitiger Störungen in Kurvenfahrt bei 50 km/h zeigen beide Störungsarten im Vergleich zur Geradeausfahrt, dass

¹⁹¹ Neukum et al. (2010): Einflussfaktor Fahrzeug - Zur Übertragbarkeit von Aussagen über die Wirkung von Zusatzlenkmomenten

die Bewertungen der Kurvenfahrten nicht kritischer als vergleichbare Störungen in Geradeausfahrt sind, obwohl die lenkwinkelinduzierten Störreaktionen in der Kurvenfahrt betragsmäßig größer als in Geradeausfahrt sind. Eine Ursache kann für das Ergebnis mit den hier durchgeführten Versuchen nicht angegeben werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass eine von der Fahrsituation unterschiedliche Bewertungssensitivität der Fahrer vorliegt. Als eine mögliche Begründung des Ergebnisses kann die in der Kurvenfahrt erhöhte (Lenk-) Regeltätigkeit der Fahrer angenommen werden, die die notwendige Störungskompensation überdeckt. Erschwerend für die Bewertung durch die Fahrer könnten auch die stationäre Querschleunigung und Gierrate der Kurvenfahrt wirken, die der Störung überlagert sind.

Der Nutzen von Störungsuntersuchungen mit irreversible Stör lenkwinkel in Kurvenfahrten erscheint fraglich, da ein Bewertungsunterschied zwischen Kurven- und Geradeausfahrt durch normal geübte Fahrer trotz größerer Störung hier nicht nachgewiesen werden kann.¹⁹² Mit Rücksicht auf den Versuchsaufwand in Kurvenfahrten erscheint es daher für die Praxis hinreichend, die Störungsuntersuchung nur in Geradeausfahrt durchzuführen, da gleich bewertete Störungen in Geradeausfahrten im Mittel bei kleineren Quer- und Gierratenmaxima dokumentiert werden.

Für die Praxis zeigen die Ergebnisse, dass die Auswirkungen durch einen Stör lenkwinkel der Hinterachslenkung im Vergleich zur Vorderachsstörung, bezogen auf die Kennwerte der maximalen Querschleunigung und maximalen Gierrate, geringer bei vernachlässigbarem Bewertungsunterschied sind. Damit müssen für die Kontrollierbarkeit einer Hinterachslenkung im Fehlerfall keine strengeren Anforderungen an die Überwachungseinrichtungen des hinteren Lenksystems gestellt werden als an Überlagerungslenkanlagen.

Aus den nicht gefährlich bewerteten Störungen wird für 85 % der Fahrer abgeleitet, dass Störreaktionen der Hinterachse bei 100 km/h eine maximale Querschleunigung von $2,5 \text{ m/s}^2$ und eine maximale Gierrate von $12 \text{ }^\circ/\text{s}$ zur Kontrollierbarkeit nicht überschreiten sollten. Für 150 km/h beträgt die maximale Gierrate $7,8 \text{ }^\circ/\text{s}$. Für eine Geschwindigkeit von 50 km/h können keine belastbaren Grenzen angegeben werden.

Mit einer gleichen Störungsbewertung von beidseitigen und einseitigen Störungen der Hinterachse lassen sich keine aktorkonzeptabhängigen Störungsuntersuchungen für Hinterachslenkungen ableiten. Einseitige Störungen stellen aufgrund der geringeren Störung der Fahrzeugbewegungen den weniger kritischen Fall dar. Für den Nachweis der Kontrollierbarkeit ist es demnach ausreichend, die Störungen durch das hintere Lenksystem anhand der beidseitigen Störung durchzuführen.

Eine Unterscheidung der Aktorkonzepte muss bezüglich der Fahrerbewertungen nicht gemacht werden, da kein Bewertungsunterschied zwischen einer einseitigen und einer beidseitigen Störung für betragsgleiche Störungen der Fahrzeugbewegung nachgewiesen werden kann. Für die Praxis kann dennoch zwischen den beiden Aktorkonzepten unterschieden

192 Vgl. Neukum et al. (2010): Kontrollierbarkeit potenzieller Fehleingriffe des Elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP)

werden, da die Störung eines Rades¹⁹³ bei identischem Stör lenkwinkel kleinere Störungen der Fahrzeugbewegung gegenüber einer beidseitigen Störung hervorruft, sofern Synchronitätsbedingungen beider Radaktoren im Störungsfall keine Anwendung finden.

Für die bewerteten Störreaktionen der Vorderachs lenkwinkel und beidseitiger Stör lenkwinkel der Hinterachse kann in dieser Arbeit kein Unterschied nachgewiesen werden. Jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei größeren Stör lenkwinkel an der Hinterachse doch eine statistisch unterscheidbare Bewertungsverteilung entsteht. Die sich damit ergebende Ortsabhängigkeit des Stör lenkwinkels würde eine erneute Diskussion über die Bewertungsgrößen der Störreaktionen rechtfertigen.

193 In dieser Arbeit werden nur einseitige Störaufschaltungen durch Lenkwinkelsprünge in Radnachspur untersucht. Störaufschaltungen mit Radnachspur bilden gegenüber Störaufschaltungen in Radvorspur eine größere Störung der Fahrzeugbewegung aus.

9 Zusammenfassung

Die Entwicklung leistungsfähiger Aktoren im Bereich des Fahrwerks motiviert eine (erneute) Prüfung des Einsatzes einer Hinterachslenkung im Pkw. Mit dem Einsatz einer Hinterradlenkung wird durch den Lenkwinkel der Hinterräder dem System Kraftfahrzeug ein weiterer Freiheitsgrad hinzugefügt. Im Vergleich zu einer Überlagerungslenkung (AFS) kann durch die funktionale Weiterverwendung des Freiheitsgrades an der Hinterachse die Fahrzeugdynamik gezielt beeinflusst werden.

Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Ermittlung des fahrerwirksamen Nutzens des zusätzlichen Freiheitsgrads und die Evaluation durch Normalfahrer sowie die Identifikation einer Versagensauswirkung, die eine Lenksystemstörung zur Folge haben kann.

In der Literatur wurden einige Konzepte zur Nutzung des zusätzlichen Freiheitsgrades an der Hinterachse bereits vorgestellt. Die erwarteten fahrerwirksamen Vorteile wurden nicht für alle Konzepte durch Normalfahrer in Probandenversuchen validiert und publiziert. In den publizierten Probandenuntersuchungen wurden Strategien, die einen geringen Zeitverzug zwischen Gierrate und Querbeschleunigung aufweisen, von den Fahrern positiv bewertet. Ein in der Literatur mehrfach vermuteter Zusammenhang zwischen der Bewertung der Fahrer und dem Zeitverzug zwischen der Gierrate und Querbeschleunigung wurde bisher in Fahrversuchen nicht nachgewiesen, deshalb ist ein Ziel dieser Arbeit den Zusammenhang zwischen der fahrerindividuellen Einschätzung der Beanspruchung beim Fahren einerseits und der Gierrate und Querbeschleunigung andererseits durch eine gezielte Variation des Zeitverzugs in Probandenversuch im Fahrzeug zu untersuchen.

Das zweite Ziel der Arbeit ist durch die Realisierung des Freiheitsgrades an der Hinterachse motiviert. Der Ausfall eines Aktors bedeutet im schlimmsten anzunehmenden Fall ein Lenkwinkel mit dem maximal möglichen Winkel des Aktors. Im Fall eines solchen Stellfehlers muss die durch den Fehler auftretende Störung der Fahrdynamik vom Fahrer beherrscht werden können. Für Überlagerungslenkungen wurden Störungsuntersuchungen bereits publiziert. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Störungsversuche bei Überlagerungslenkungen auf Hinterradlenkungen erscheint aufgrund der unterschiedlichen Wirkkette fraglich, insbesondere wenn eine radindividuelle Aktorik eingesetzt wird.

Der Einfluss eines Zeitverzugs auf die Beanspruchung des Fahrers wird durch eine gezielte Variation der Lenkübersetzung der Hinterräder in den unterschiedlichen Manövern Fahrspurwechsel und Makrosinus untersucht. In den Manövern wird ein Zeitverzug von -44 ms bis +81 ms zwischen der Querbeschleunigung und der Gierrate bei konstanter Gierverstärkung variiert und im Paarvergleich durch die Fahrer bewertet. Die Auswertungen von 34 Probanden zeigen, dass eine Sensitivität der Fahrer auf die dargestellten Zeitverzüge nicht nachgewiesen werden kann. Auch kann eine Reduktion der fahrerinternen Beanspruchung durch die kleineren Phasenverzüge nicht belegt werden.

Durch die repräsentative Auswahl der Zeitverzögerungen folgt aus den Ergebnissen, dass eine Hinterradlenkung zugunsten anderer fahrdynamischer Kriterien, wie z. B. Stabilität oder geschwindigkeitsunabhängige Gierdämpfung, ausgelegt werden kann und die Auswirkungen der Zeitverzögerungen auf ein mögliches Fahrerurteil vernachlässigbar sind.

Für die Versagensauswirkung im Fall einer Störung des hinteren Lenksystems kann aufgrund der Bewertungen von 33 Probanden in lenkwinkelinduzierten Störungsversuchen kein Unterschied zwischen Störungen der Vorderachse und beidseitigen Störleinkwinkeln der Hinterachse belegt werden. Störreaktionen des hinteren Lenksystems werden im Vergleich zu betragsgleichen Störungen des vorderen Lenksystems bei Geschwindigkeiten von 50, 100 und 150 km/h nicht kritischer bewertet.

Auch kann ein Bewertungsunterschied zwischen ein- und beidseitigen Störungen des hinteren Lenksystems in den Fahrerurteilen nicht nachgewiesen werden, sodass eine Unterscheidung zwischen Ein- und Doppelaktorkonzepten bei der Identifikation der Kontrollierbarkeit nicht notwendig erscheint.

Eine unterschiedliche Bewertung der Störreaktionen in Kurvenfahrten zu Geradeausfahrten bei 50 km/h kann nicht nachgewiesen werden, obwohl die Störungen der Fahrzeugbewegung in Kurvenfahrten größer ausfallen. Ein experimenteller Nachweis der Beherrschbarkeit im Störfall erscheint in Geradeausfahrt aufgrund der sensitiveren Bewertung der Fahrer hinreichend.

Die durchgeführten Störungsversuche erweitern den Erkenntnisraum um die Störung der Fahrzeugbewegung im Fall von Störleinkwinkeln an der Hinterachse. Mit den durchgeführten Versuchen sind Abschätzungen für maximal zulässige Stellfehler im Fahrbetrieb bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Fahrmanövern möglich. Für den Einsatz einer Hinterachslenkung müssen aufgrund der Ergebnisse keine strengeren Anforderungen an die Überwachungseinrichtungen der Hinterachslenkung als an Überlagerungslenkanlagen gestellt werden.

10 Anhang

10.1 Parameter des Versuchsfahrzeugs

Für die Abschätzung der zu erwartenden Phasendifferenz und der Störung der Fahrzeugbewegung werden in dieser Arbeit die in Tabelle 10.1 dargestellten Parameter verwendet.

Tabelle 10.1: Eingesetzte Parameter des Einspurmodells.

Größe	Wert	Erläuterung
l_v	1,28 m	Abstand Schwerpunkt-Vorderachse
l_h	1,58 m	Abstand Schwerpunkt-Hinterachse
l	2,86 m	Radstand
m	1782 kg	Masse
Θ	3086 kgm ²	Gierträgheit um die z-Achse
c_v	84101 N/rad	Achsschräglaufsteifigkeit Vorderachse
c_h	171419 N/rad	Achsschräglaufsteifigkeit Hinterachse

10.2 Parameter der Hinterachslenkübersetzung

$$a = T_{12} \cdot \omega_f^4 - 2 \cdot T_{12} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^2 + T_{12} \cdot T_{22} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^4 - 2 \cdot T_{12} \cdot T_{22} \cdot \omega^4 \cdot \omega_f^2 + T_{12} \cdot \omega^4 + T_{12} \cdot T_{22} \cdot \omega^6 \\ + 4 \cdot T_{14} \cdot \sigma_f^2 \cdot \omega^2 + T_{14} \cdot \omega_f^4 - 2 \cdot T_{14} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^2 + T_{14} \cdot \omega^4 + 4 \cdot T_{12} \cdot \omega^2 \cdot \sigma_f^2 + 4 \cdot T_{12} \cdot T_{22} \cdot \omega^4 \cdot \sigma_f^2$$

$$b = -T_{12} \cdot \omega_f^4 + 2 \cdot T_{12} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^2 - T_{11} \cdot \omega_f^4 + 2 \cdot T_{11} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^2 + T_{12} \cdot T_{21} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^4 - 2 \cdot T_{12} \cdot T_{21} \cdot \omega^4 \cdot \omega_f^2 \\ - T_{11} \cdot T_{22} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^4 + 2 \cdot T_{11} \cdot T_{22} \cdot \omega^4 \cdot \omega_f^2 - T_{12} \cdot \omega^4 - T_{11} \cdot \omega^4 + T_{12} \cdot T_{21} \cdot \omega^6 - T_{11} \cdot T_{22} \cdot \omega^6 \\ + 4 \cdot T_{13} \cdot \omega^2 \cdot \sigma_f^2 - 4 \cdot T_{14} \cdot \omega^2 \cdot \sigma_f^2 - T_{14} \cdot \omega_f^4 + T_{13} \cdot \omega_f^4 - T_{14} \cdot \omega^4 + T_{13} \cdot \omega^4 - 4 \cdot T_{11} \cdot \omega^2 \cdot \sigma_f^2 \\ - 4 \cdot T_{11} \cdot T_{22} \cdot \omega^4 \cdot \sigma_f^2 - 4 \cdot T_{12} \cdot \omega^2 \cdot \sigma_f^2 + 4 \cdot T_{12} \cdot T_{21} \cdot \omega^4 \cdot \sigma_f^2 - 2 \cdot T_{13} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^2 + 2 \cdot T_{14} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^2$$

$$c = T_{11} \cdot \omega_f^4 - 2 \cdot T_{11} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^2 - T_{11} \cdot T_{21} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^4 + 2 \cdot T_{11} \cdot T_{21} \cdot \omega^4 \cdot \omega_f^2 + T_{11} \cdot \omega^4 - T_{11} \cdot T_{21} \cdot \omega^6 \\ - 4 \cdot T_{13} \cdot \omega^2 \cdot \sigma_f^2 - T_{13} \cdot \omega_f^4 - T_{13} \cdot \omega^4 + 4 \cdot T_{11} \cdot \omega^2 \cdot \sigma_f^2 - 4 \cdot T_{11} \cdot T_{21} \cdot \omega^4 \cdot \sigma_f^2 + 2 \cdot T_{13} \cdot \omega^2 \cdot \omega_f^2$$

$$T_{11} = \frac{m v l_v}{c_h l} \quad T_{12} = \frac{m v l_h}{c_v l} \quad T_{13} = \frac{l_h}{v} \quad T_{14} = \frac{l_v}{v} \quad T_{21} = \frac{\Theta_z}{c_h l} \quad T_{22} = \frac{\Theta_z}{c_v l}$$

$$\omega_f = \sqrt{\left(\frac{c_v c_h l^2 + m v^2 (c_h l_h - c_v l_v)}{\Theta \cdot m \cdot v^2} \right)} \quad \sigma_f = \frac{m (c_v l_v^2 + c_h l_h^2) + \Theta (c_v + c_h)}{2 \cdot \Theta m v}$$

10.3 Messtechnik des Versuchsfahrzeugs

	Fahrzeugsensorik	Messbereich Messgeräte (Genauigkeit, Digitalisierung)	Messgerät (Hersteller)
Längsgeschwindigkeit	0,1 km/h digital.	0,5 bis 400 km/h $\leq 0,1\%$	Correvit S400 (Datron-Corrsys)
Quergeschwindigkeit		0,2 bis 70 km/h $\leq 0,1\%$	Correvit S400 (Datron-Corrsys)
Schwimmwinkel		$\pm 40^\circ \leq \pm 0,5^\circ$	Correvit S400 (Datron-Corrsys)
Drehraten (x,y,z)	nur Gierrate 0,06 °/s digital.	x,y: $\pm 98^\circ/\text{s} \pm 0,15^\circ$ z: $\pm 320^\circ/\text{s} \pm 0,15^\circ$	ADMA-G (Genesys)
Beschleunigungen (x,y,z)	Nur a_y 0,016 m/s ² digital.	$\pm 2,5 \text{ g} \pm 1,5 \text{ mg}$	ADMA-G (Genesys)
Absolute Position		$\leq 0,1 \text{ m}$	ADMA-G (Genesys)
Lenkradwinkel	1,5 ° digital.	$\pm 100^\circ$, 0,2 ° digital. $\pm 1000^\circ$, 2 ° digital.	Messlenkrad CL-1 (Caesar)
Lenkradmoment	—	$\pm 10 \text{ Nm}$, 0,02 Nm digital. $\pm 100 \text{ Nm}$, 0,2 Nm digital.	Messlenkrad CL-1 (Caesar)
Ritzelwinkel	0,05 ° digital.		
Lenkwinkel (HL, HR)	0,001 ° digital.		

10.4 Fragebogen zur Systemauslegung

Der in den Abbildungen 10.1 und 10.2 dargestellte Fragebogen wird für die Versuche des Spurwechsels und des Makrosinus angewandt. Frage 5 entfällt in den Makrosinusversuchen.

1. Wie stark unterscheiden sich die zwei Varianten?

nicht gering mittel stark

☐ ☐ ☐ ☐

2. Bei welcher Variante spricht das Fahrzeug auf einen Lenkeinschlag schneller an?

Varianten A Varianten B

Viel schneller | | | 0 | | | Viel schneller

A 3 A 2 A 1 0 B 1 B 2 B 3

3. Bei welcher Variante ist es Ihnen leichter gefallen die Fahraufgabe zu bewältigen?

Varianten A Varianten B

Viel leichter | | | 0 | | | Viel leichter

A 3 A 2 A 1 0 B 1 B 2 B 3

4. Welche der Varianten reagiert direkter auf Lenkbefehle?

Varianten A Varianten B

Viel direkter | | | 0 | | | Viel direkter

A 3 A 2 A 1 0 B 1 B 2 B 3

Abbildung 10.1: Fragebogen zum Spurwechsel- und Makrosinusversuch (Seite 1)

5. Welche Variante neigte stärker zum Überschwingen?

Variante A

Variante B

**6. Wie beurteilen Sie das Wankverhalten der beiden Varianten?**

Variante A

Variante B

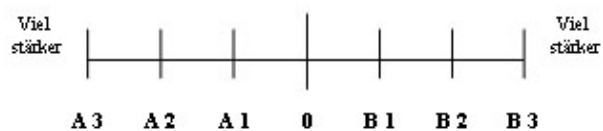


Abbildung 10.2: Fragebogen zum Spurwechsel- und Makrosinusversuch (Seite 2)

10.5 Ermittlung des Zeitverzugs im Makrosinusversuch

Der auszuwertende Zeitverzug zwischen Lenkradwinkelsignal (Eingang) und Querbeschleunigungs- bzw. Gierratensignal (jeweils Ausgang) wird aus den Zeitverläufen des Ritzelwinkels und der Querbeschleunigung im Schwerpunkt und der Gierrate ermittelt. Durch das Umfahren der Pylonen bei konstanter Geschwindigkeit im Makrosinusversuch stellt sich ein monofrequentes Lenkradwinkelsignal ein. Aus dem eingeschwungenen Signal des Lenkradwinkels wird an der Stelle der maximalen Leistungsdichte (vgl. Abbildung 10.3) eine Grundfrequenz ω_G des Lenkradwinkelsignals ermittelt. Mithilfe der Phasenwinkel von Querbeschleunigung zu Lenkradwinkel φ_{ay} und Gierrate zu Lenkradwinkel φ_ψ können aus den experimentell ermittelten Phasengängen an der Stelle der Grundfrequenz die Zeitverzüge zum Lenkradwinkel bestimmt werden. Die Phasengänge werden versuchsindividuell ermittelt und unterliegen damit den gleichen Versuchsbedingungen wie das Ritzelwinkelsignal. Da der Makrosinusversuch eine ungerade Anzahl an Sinus-Halbbögen aufweist, wird die Umfahrung der ersten Pylonen nicht ausgewertet. Aus der Phasendifferenz von Querbeschleunigung und der Gierrate wird der Phasenverzug $\Delta\tau$ bestimmt (siehe auch Gleichung 6.9).

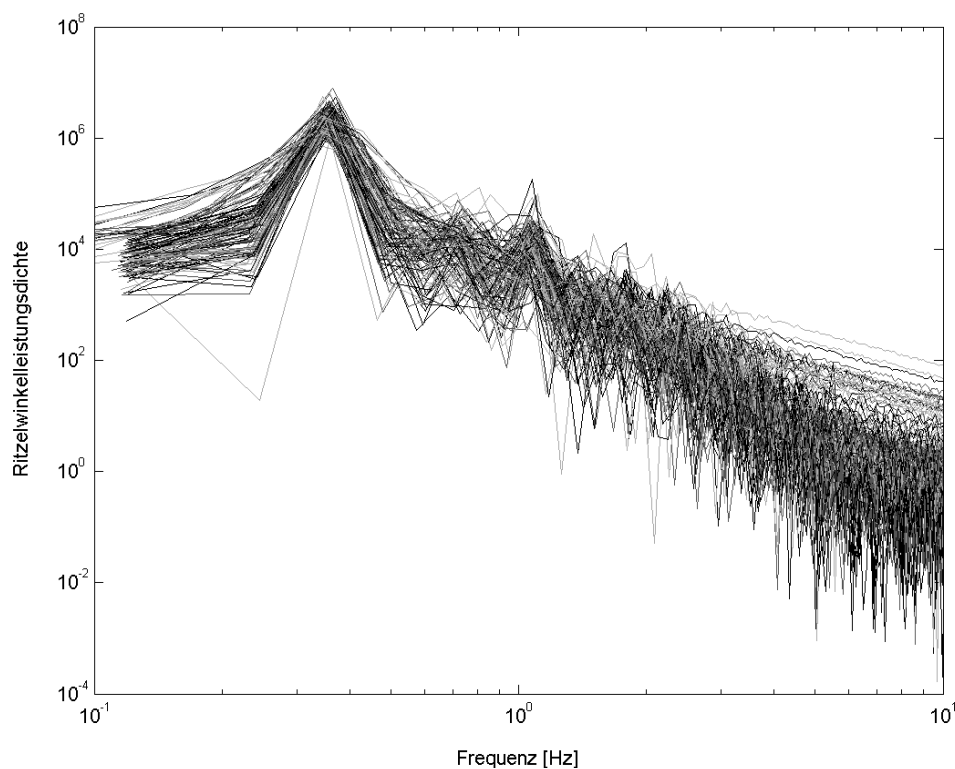


Abbildung 10.3: Spektrale Leistungsdichte des Ritzelwinkelsignals der Variante 0 im Probandenversuch bei 80 km/h.

10.6 Objektive Störungsauswertung im Open-Loop

Zur Ermittlung der Fahrzeugreaktion ohne Einfluss des Fahrers werden in Geradausfahrt Störleinkwinkel aufgeschaltet während der Lenkraddrehfreiheitsgrad gesperrt ist (fixed-control). Der Störleinkwinkel wird analog zum Closed-Loop-Versuch als Sprung (mit einer Rampensteigung von 26 °/s) aufgeschaltet. Als Datengrundlage liegen den Abbildungen 10.4 und 10.5 insgesamt 301 Messungen der beidseitigen Störungen und 140 Messungen der einseitigen Störungen zugrunde.

Die Abbildungen zeigen die maximale Querbeschleunigung und Gierrate, die infolge der Störung der Fahrzeugbewegung entstehen. Die angegebenen maximalen Querbeschleunigungen und Gierraten sind jeweils auf die stationären Werte bezogen, die 300 ms vor Aufschaltung der Störung in den Messungen dokumentiert sind. Jeweils rechts in den Abbildungen sind die Residuen dargestellt, die die Zulässigkeit der Ausgleichsfunktion belegen.

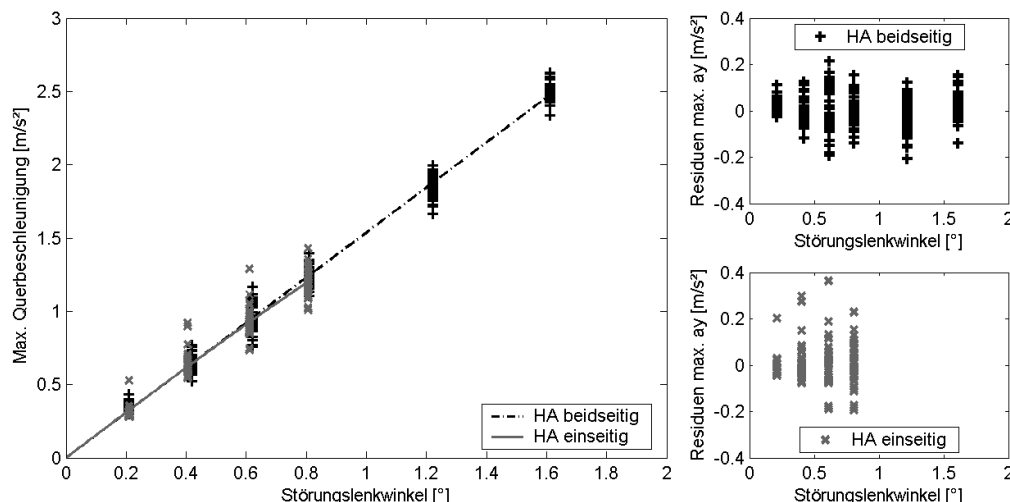


Abbildung 10.4: Störungsauswirkung (maximale Querbeschleunigung) im Open-Loop-Versuch mit fixiertem Lenkrad bei 50 km/h (für einseitige Störung ist der halbe Störleinkwinkel auf der Abszisse aufgetragen).

Aus den beiden Abbildung 10.4 und 10.5 kann entnommen werden, dass bei fehlender Fahrerreaktion die Störung unabhängig von einer einseitigen oder zweiseitigen Störung ist. Bei der Interpretation der Darstellungen muss beachtet werden, dass in den dargestellten Abbildungen der doppelte Störleinkwinkel der einseitigen Störung zusammen mit einfachen Störleinkwinkel einer beidseitigen Störung dargestellt ist, um die Störungsauswirkungen vergleichen zu können.

Die Unabhängigkeit der Störungsart wird auch für Geschwindigkeiten von 100 km/h nachgewiesen werden (Abbildung 10.6 und Abbildung 10.7). Die Datengrundlage der Abbildungen 10.6 und 10.7 beträgt für die beidseitigen Störungen 216 Messungen und für die einseitigen Störungen 131 Messungen.

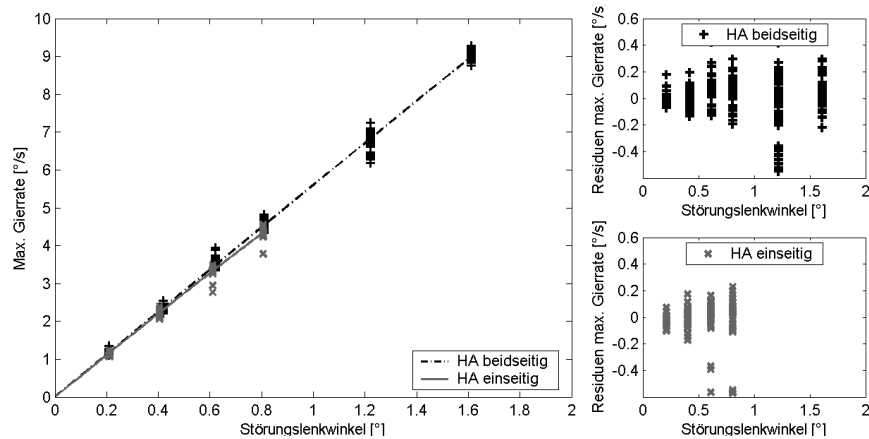


Abbildung 10.5: Störungsauswirkung (maximale Gierrate) im Open-Loop-Versuch mit fixiertem Lenkrad bei 50 km/h (für einseitige Störung ist der halbe Störlenkwinkel auf der Abszisse aufgetragen).

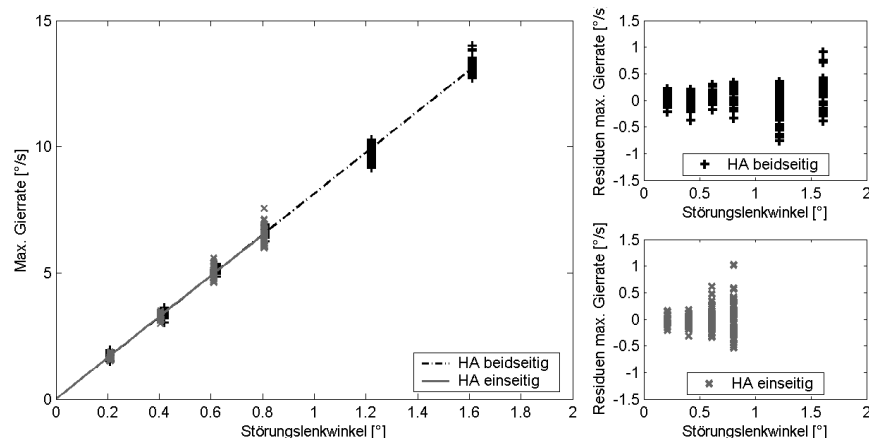


Abbildung 10.6: Störungsauswirkung (maximale Gierrate) im Open-Loop-Versuch mit fixiertem Lenkrad bei 100 km/h. (für einseitige Störung ist der halbe Störlenkwinkel auf der Abszisse aufgetragen).

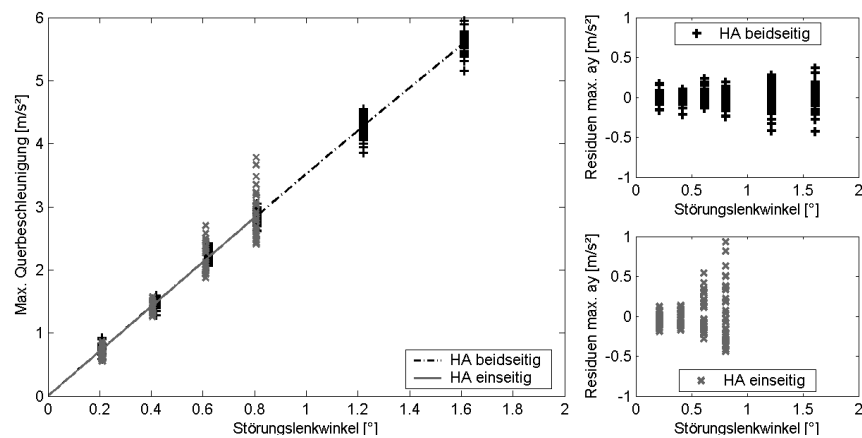


Abbildung 10.7: Störungsauswirkung (maximale Querbearbeitung) im Open-Loop-Versuch mit fixiertem Lenkrad bei 100 km/h (für einseitige Störung ist der halbe Störlenkwinkel auf der Abszisse aufgetragen).

10.7 Störungsbewertung

Die Abbildungen 10.8 und 10.9 zeigen die Störungsbewertungen sowie die Residuen der Bewertungen. Anhand der Residuen der Störungsbewertung wird gezeigt, dass die Wahl der Ausgleichsfunktion $a \tan(b x)$ in Kapitel 7 für diese Untersuchung zulässig ist.

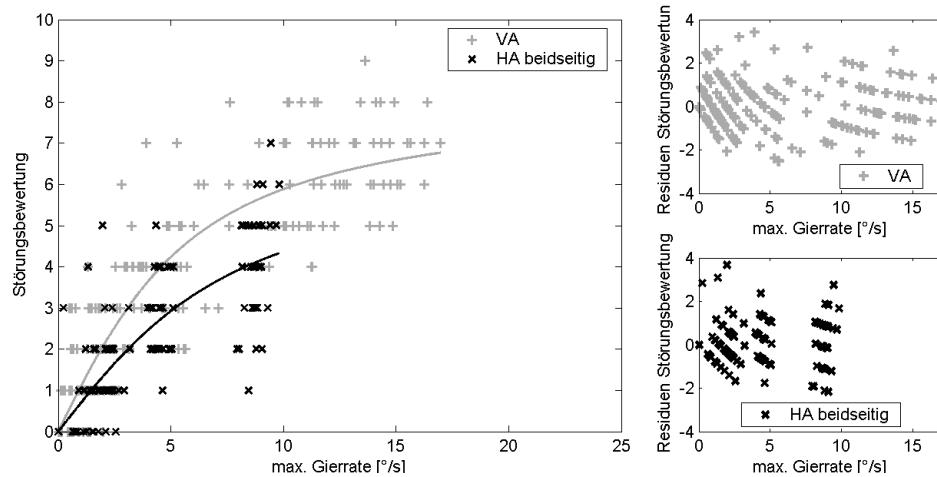


Abbildung 10.8: Störungsbewertung über maximaler Gierrate durch beidseitige Störungen durch die Hinterachse und Störungen durch die Vorderachse bei 50 km/h.

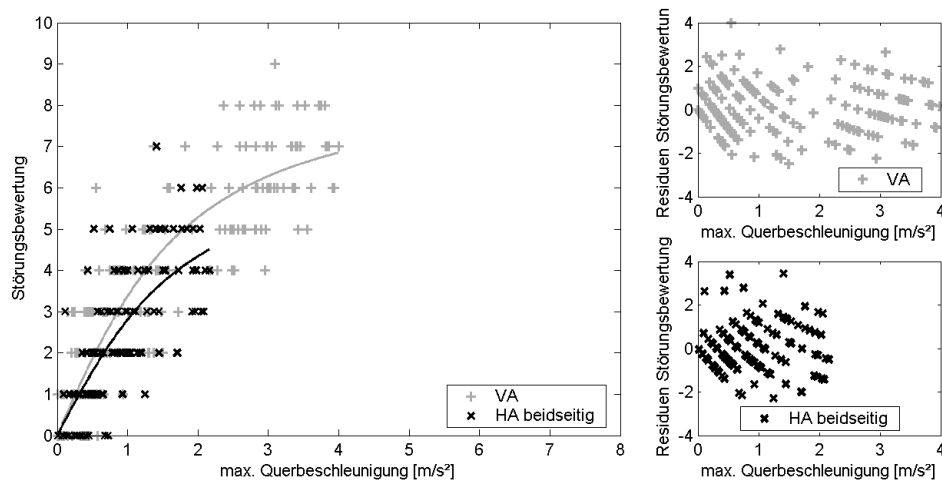


Abbildung 10.9: Störungsbewertung über maximaler Querschleunigung durch beidseitige Störungen durch die Hinterachse und Störungen durch die Vorderachse bei 50 km/h.

Die Abbildungen 10.10 bis 10.14 zeigen die kumulierte Häufigkeit unkritischer Bewertungen für ein- und beidseitige Störungen durch die Hinterachse.

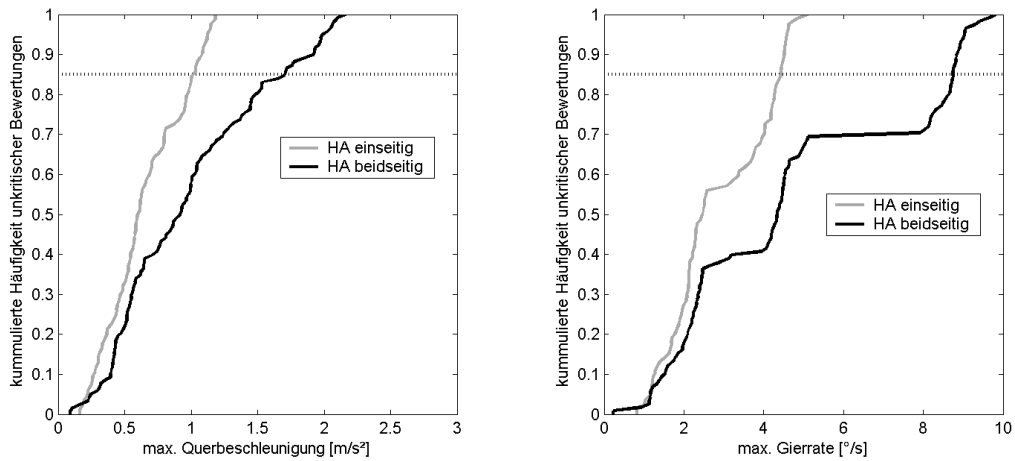


Abbildung 10.10: Kumulierte Häufigkeit nicht gefährlicher Bewertungen einer einseitigen und beidseitigen Störung durch die Hinterachse bei 50 km/h.

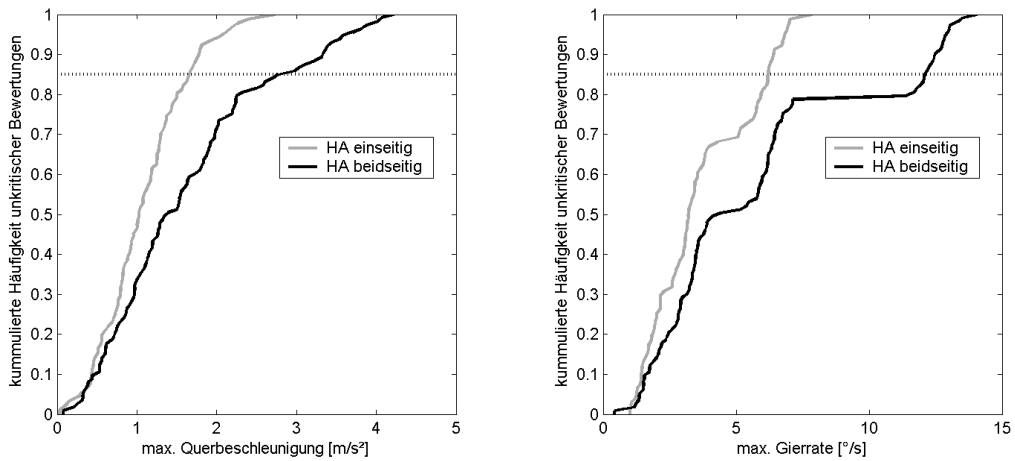


Abbildung 10.11: Kumulierte Häufigkeit nicht gefährlicher Bewertungen einer einseitigen und beidseitigen Störung durch die Hinterachse bei 100 km/h.

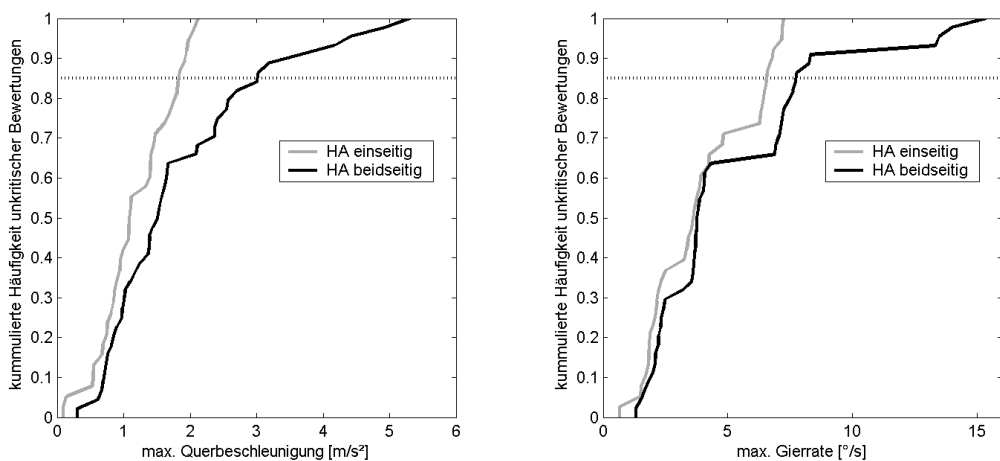


Abbildung 10.12: Kumulierte Häufigkeit nicht gefährlicher Bewertungen einer einseitigen und beidseitigen Störung durch die Hinterachse bei 150 km/h.

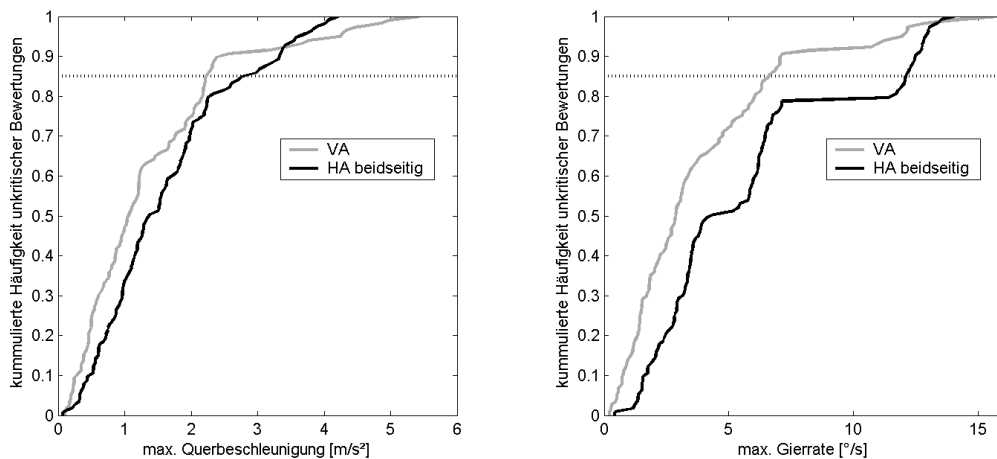


Abbildung 10.13: Kumulierte Häufigkeit nicht gefährlicher Bewertungen einer beidseitigen Störung durch die Hinterachse und einer Störung durch die Vorderachse bei 100 km/h.

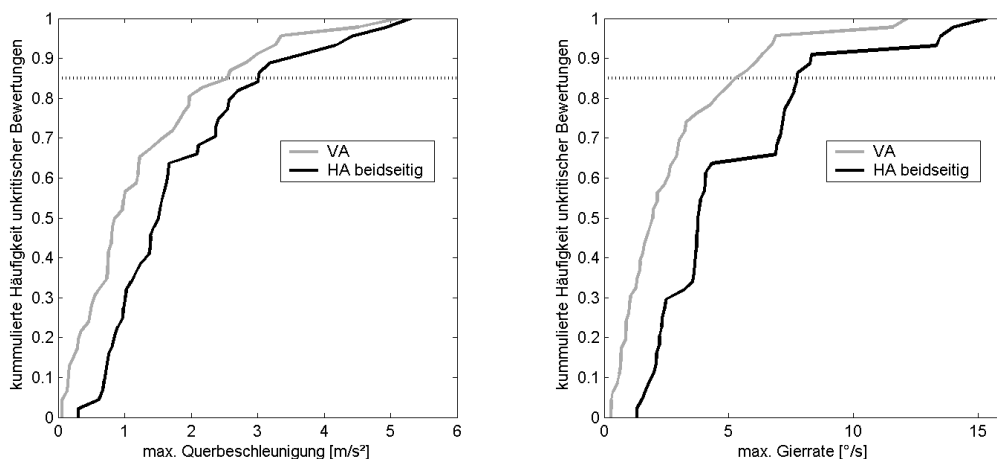


Abbildung 10.14: Kumulierte Häufigkeit nicht gefährlicher Bewertungen einer beidseitigen Störung durch die Hinterachse und einer Störung durch die Vorderachse bei 150 km/h.

10.8 Objektive Störungsauswertung und Fahrerbewertung im Closed-Loop

Die Abbildungen 10.15 bis 10.22 zeigen die maximalen Querbeschleunigung und Gierraten in Abhängigkeit des aufgeprägten Störwinkel. Zusammen mit der jeweiligen dritten Abbildung, der Fahrerbewertung über dem Störwinkel, können die Abbildungen in Kapiteln 7.4 bis 7.7 gebildet werden. Im Gegensatz zu den Abbildungen in Kapitel 7.7 ist in diesem Kapitel der Störwinkel der einseitigen Störungen an der Hinterachse (siehe Abbildung 10.22) auf der Abszisse mit dem realen Radstörwinkel aufgetragen.

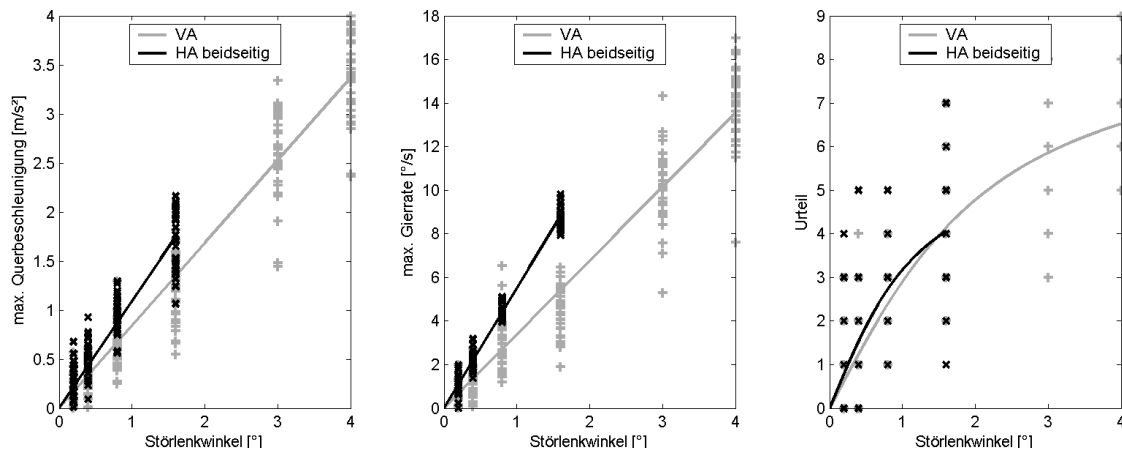


Abbildung 10.15: Maximale Querbeschleunigung, Gierrate und Fahrerbewertung in Folge eines Störwinkel an der Vorderachse bzw. eines beidseitigen Störwinkel an der Hinterachse bei 50 km/h im Probandenversuch in Geradeausfahrt.

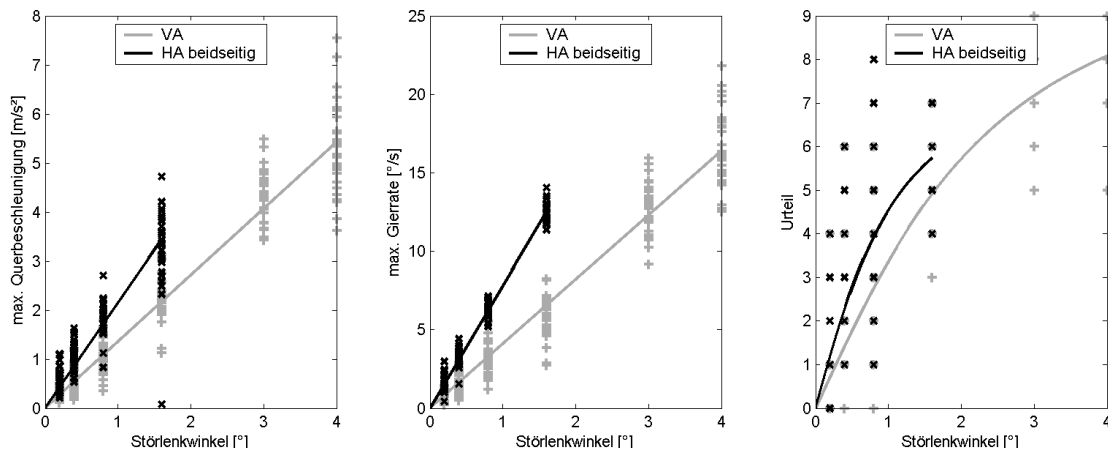


Abbildung 10.16: Maximale Querbeschleunigung, Gierrate und Fahrerbewertung in Folge eines Störwinkel an der Vorderachse bzw. eines beidseitigen Störwinkel an der Hinterachse bei 100 km/h im Probandenversuch in Geradeausfahrt.

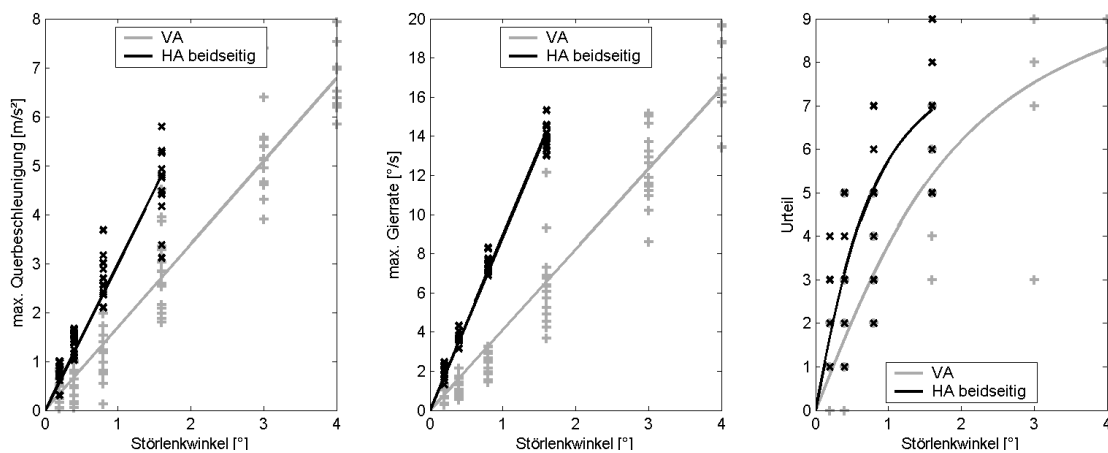


Abbildung 10.17: Maximale Querbeschleunigung, Gierrate und Fahrerbewertung in Folge eines Störwinkel an der Vorderachse bzw. eines beidseitigen Störwinkel an der Hinterachse bei 150 km/h im Probandenversuch in Geradeausfahrt.

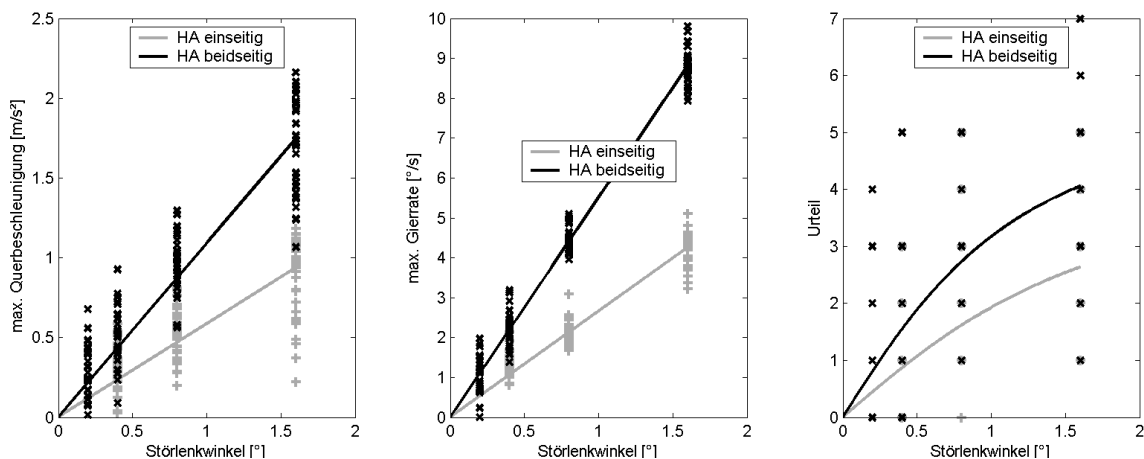


Abbildung 10.18: Maximale Querbeschleunigung, Gierrate und Fahrerbewertung in Folge . eines einseitigen bzw. beidseitigen Störtenkwinkels an der Hinterachse bei 50 km/h im Probandenversuch in Geradeausfahrt.

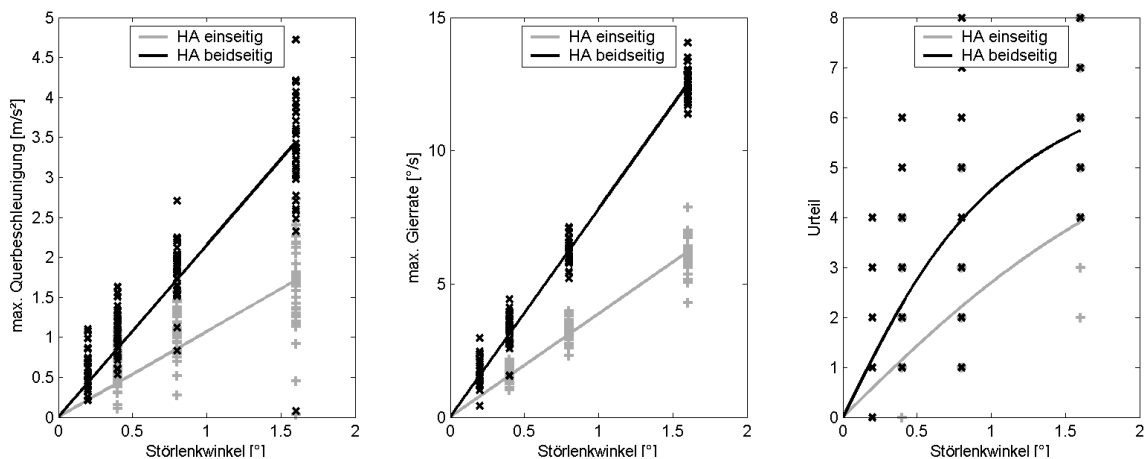


Abbildung 10.19: Maximale Querbeschleunigung, Gierrate und Fahrerbewertung in Folge . eines einseitigen bzw. beidseitigen Störtenkwinkels an der Hinterachse bei 100 km/h im Probandenversuch in Geradeausfahrt.

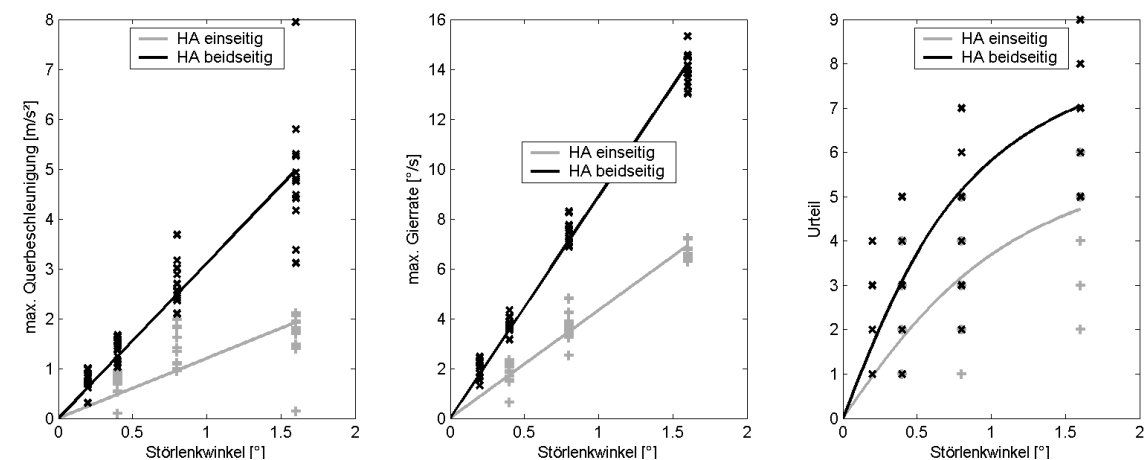


Abbildung 10.20: Maximale Querbeschleunigung, Gierrate und Fahrerbewertung in Folge . eines einseitigen bzw. beidseitigen Störtenkwinkels an der Hinterachse bei 150 km/h im Probandenversuch in Geradeausfahrt.

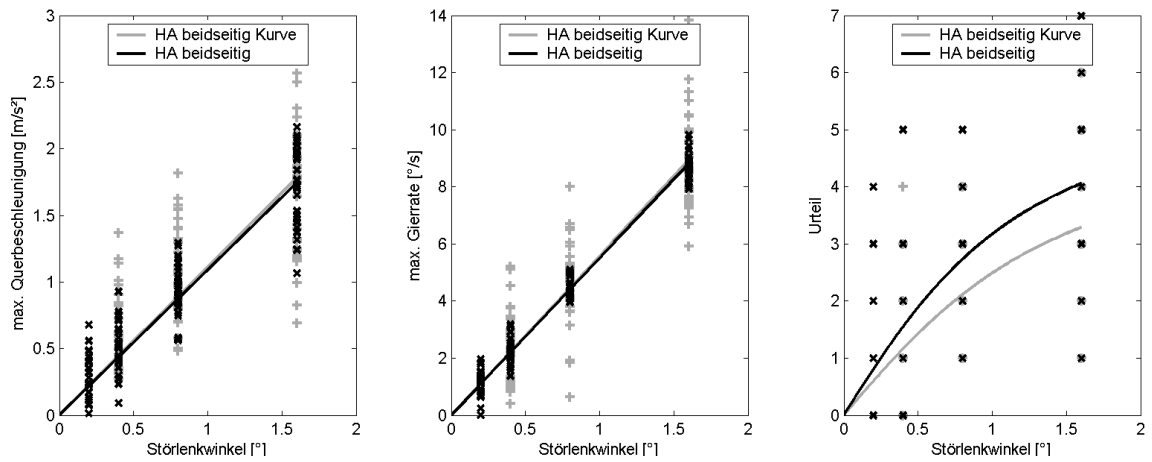


Abbildung 10.21: Maximale Querbeschleunigung, Gierrate und Fahrerbewertung in Folge eines beidseitigen Störtenkwinkels an der Hinterachse bei 50 km/h im Probandenversuch in Kurvenfahrt und Geradeausfahrt.

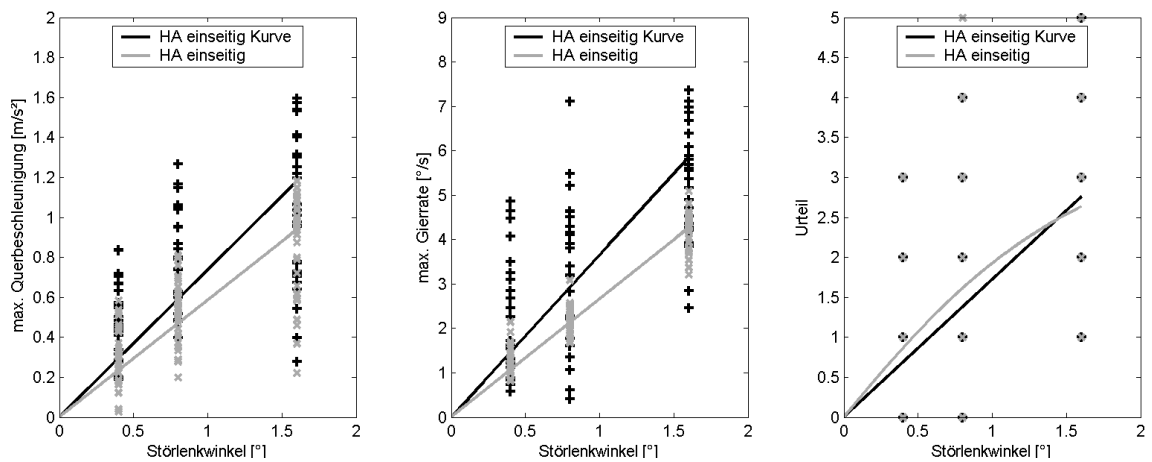


Abbildung 10.22: Maximale Querbeschleunigung, Gierrate und Fahrerbewertung in Folge eines einseitigen Störtenkwinkels an der Hinterachse bei 50 km/h im Probandenversuch in Kurvenfahrt und Geradeausfahrt.

11 Literatur

- Ammon, D.:** Modellbildung und Systementwicklung in der Fahrzeugdynamik. Bd. 73 *Leitfäden der angewandten Mathematik und Mechanik*. Stuttgart: Teubner 1997. ISBN 3-519-02378-4
- Barthenheier, T.; Winner, H.:** Das persönliche Lenkgefühl. In: TÜV Automotive GmbH und Technische Universität München (Hrsg. Bd.) *Fahrwerk.tech*. Garching, 11.-12. März 2003
- Beiker, S.:** Verbesserungsmöglichkeiten des Fahrverhaltens von Pkw durch zusammenhängende Regelsysteme. *Fortschritt-Bericht Reihe 12* Nr. 418. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000. ISBN 3-18-341812-6
- Berkefeld, V.; Seifert, G.:** Four Wheel Steering - Handling and Disturbance Compensation on Surfaces with Various Friction Conditions. In: *Proceedings of 24. FISITA Congress, London, UK, Nr. 925051, Vol. 1, S. 87-94* (1992)
- Berkefeld, V.:** Theoretische Untersuchung zur Vierradlenkung. In: Wallentowitz, Henning (Hrsg. Bd.) *Allradlenksysteme bei Personenkraftwagen - Referate der Fachtagung "Allradlenksysteme bei Personenkraftwagen" vom 28.-29. November im Haus der Technik, Essen*. Braunschweig [u.a.] : Vieweg Verlag, 1991. ISBN 3-528-06399-8, S.
- Bisimis, E.; Beckmann, H.; Rönitz, R.; Zomotor, A.:** Lenkwinkel-Sprung und Übergangsverhalten von Kraftfahrzeugen. *ATZ Automobiltechnische Zeitung*. Nr. 79, (1977), Nr. 12, S. 577-586
- Bortz, J.; Döring, N.:** Forschungsmethoden und Evaluation. *Springer-Lehrbuch, Springer eBook Collection, Behavioral Science*. 4. Aufl. Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 2006. ISBN 3-540-33305-3
- Bortz, J.; Weber, R.:** Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. *Springer-Lehrbuch*. 6. Auflage. Heidelberg: Springer Medizin, 2005. ISBN 3-540-21271-X
- Bortz, J.:** Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. *Springer-Lehrbuch*. 6. Auflage. Heidelberg: Springer-Medizin-Verlag, 2005 - ISBN 3-540-21271-X
- Braun, A.; John, A.:** Elektronisch geregelte Hinterachs-Lenkanlage RAS-EC für Nutzfahrzeuge. *ATZ Automobiltechnische Zeitung*. Nr. 105, (2003), Nr. 7/8, S. 662-669
- Clauß, G.; Ebner, H.:** Grundlagen der Statistik für Psychologen, Pädagogen und Soziologen. Frankfurt am Main [u. a.]: Harri Deutsch Verlag, 1972. ISBN 3-87144-079-5
- Donges, E.:** Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur Aktiven Sicherheit im Straßenverkehr. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*. (1993), Nr. 10, S. 277-280

Donges, E.: Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur Aktiven Sicherheit im Straßenverkehr. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik. (1993), Nr. 9, S. 241-246

Eckrich, M.; Bartz, R.: Das Sicherheitskonzept der BWM-Aktivlenkung. VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik. (2006), Nr. 12, S. 317-326

Eckrich, M.; Pischinger, M.; Krenn, M.; Bartz, R.; Munnix, P.: Aktivlenkung - Anforderungen an Sicherheitstechnik und Entwicklungsprozess. Proceedings of 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik. Aachen, 7.- 9. Oktober 2002, S. 1169-1184

Freitag, R.; Moser, M.; Hartl, M.; Koepernik, J.; Eckstein, L.: Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen mit Steer-by-Wire Funktionalität; In: Elektronik im Kraftfahrzeug. VDI-Berichte 1646. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001, S. 837-854

Fuhr, F.: Vehicle Technology Aspects of a Safety Investigation Deriving Demands for Safety Functions of an Active Steering System. International Symposium on Advanced Vehicle. Aachen, S. 181-188

Förster, H.: Der Fahrzeugführer als Bindeglied zwischen Reifen, Fahrwerk und Fahrbahn; In: VDI-Berichte 916. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991, S. 1-50

Förster, H.: Der Fahrzeugführer, ein Homo Instrumentalis. In: VDI-Berichte 948. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992, S. 379-443

Hackenberg, U.; Heißing, B.: Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr. ATZ Automobiltechnische Zeitung., Nr. 84, (1982), Nr. 7, S. 341-345

Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.: Statistik. 10. Auflage. München: Oldenbourg 1995. ISBN 3-486-23387-4

Heißing, B.; Brandl, H.: Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens. 1. Auflage. Würzburg: Vogel 2002. ISBN 3-8023-1903-6

Heißing, B.; Ersoy, M.: Fahrwerkhandbuch. Springer eBook Collection, Computer Science und Engineering. Wiesbaden: Vieweg 2007. ISBN 978-3-8348-0105-0

Herold, P.; Thalhammer, T.; Gietl, S.: Die Integral Aktivlenkung. ATZ Automobiltechnische Zeitung. ATZextra, (2008), Nr. 11, S. 104-107

Hisoaoka, Y.; Yamamoto, M.; Fujinami, H.: A Study on Desirable Steering Response and Steering Torque for Driver's Feeling. International Symposium on Advanced Vehicle Control, 1996, S. 295-305

Jürgensohn, T.; Jung, R.; Willumneit, H.: Die "Handschrift" des Lenkens. ATZ Automobiltechnische Zeitung. Nr. 99, (1997), Nr. 4, S. 216-219

Kafka-Lützow, A.: Möglichkeiten nicht-visueller Informationsaufnahme im Straßenverkehr. In: Interdisziplinäre Unfallforschung: Informationsaufnahme des Verkehrsteilnehmers/ 3. Fachtagung Verkehrssicherheit. Wien: Institut für Verkehrswesen 1994.

Klinke, R.; Silbernagl, S.; Bauer, C.: Lehrbuch Physiologie. 5. Auflage. Stuttgart: Thieme 2005. ISBN 3-13-796005-3

Kraftfahrt-Bundesamt: *Fahrzeugzulassungen - Neuzulassungen im Jahresverlauf seit 1970.* URL: <http://www.kba.de>.- Aktualisierungsdatum: 17.07.2010.

Krüger, H.; Neukum, A.; Schuller, J.: Bewertung von Fahrzeugeigenschaften - Vom Fahrgefühl zum Fahrergefühl. 3. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. Fortschritt Berichte Reihe 22 Nr. 1. Düsseldorf : VDI-Verlag 1999. ISBN 3-18-300122-5, S. 269-282

Kudritzki, D.; Willumeit, H.: Rear Axle Steering by Variable Rear Wheel Toe: A Possibility to Optimize Transient Response of Automobiles from the Driver's View too. In: SAE-Paper, Nr. 885088 (1988), S. 659-671

Kudritzki, D.: Korrelation zwischen objektiven und subjektiven Daten aus dem Fahrversuch. VDI-Berichte Nr. 974. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992, S. 319-334

Kudritzki, D.: Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 132. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989. ISBN 3-18-143212-1

Kuroki, J.; Irie, N.: HICAS: Nissans Vierradlenkungstechnologie. In: Wallentowitz, H. (Hrsg. Bd.) *Allradlenksysteme bei Personenkraftwagen - Referate der Fachtagung "Allradlenksysteme bei Personenkraftwagen" vom 28./29. November 1989 im Haus der Technik, Essen.* Braunschweig [u.a.]: Vieweg 1991. ISBN 3-528-06399-8

Kühn, H.; Goerner, E. W.: Straßenbau A-Z. Digital. Ressource. Berlin: Erich Schmidt 2002.

Los, B.; Matheis, A.; Nametz, J. E.; Smith, R. E.: Konstruktion und Entwicklung eines Fahrzeugs mit mikroprozessor-geregelter Allradlenkung. VDI-Berichte. Nr. 650. Düsseldorf: VDI-Verlag 1987. S. 239-257

Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. 4. Auflage. Berlin [u.a.]: Springer 2003. ISBN 3-540-42011-8

Muragushi, Y.; Fukui, K.; Asaga, Y.; Ono, E.: Development of Human Sensitivity Evaluation System for Vehicle Dynamics. In: Human Factors in Seating Comfort and Driving and Automotive Telematics and Advances in Instrument Panels and Interiors. SAE International 2007. ISBN 978-0-7680-1894-3

Nakaya, H.; Sano, S.; Furukawa, Y.; Oguchi, Y.: Effects of Vehicles' Yaw and Lateral Acceleration Responses on Drivers Control Performance. In: *Proceedings of 19. FISITA Congress.* Bd. 2, Nr. 82109. Melbourne 1982, S. 109.1-109.6

Neukum, A.; Krüger, H.; Schuller, J.: Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften. In: *Der Fahrer im 21. Jahrhundert*. VDI-Berichte 1613. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001. S. 13 -32

Neukum, A.; Krüger, H.: Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. In: *Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn*. VDI-Berichte 1791. Düsseldorf: VDI-Verlag 2003

Neukum, A.; Reinelt, W.: Bewertung der Funktionssicherheit aktiver Lenksysteme: ein Human Factor Ansatz. In: *Fahrer im 21. Jahrhundert*. VDI-Berichte 1919. Düsseldorf: VDI-Verlag 2005, S. 161-176

Neukum, A.; Ufer, E.; Paulig, J.; Krüger, H.: Controllability of Superposition Steering System Failures. In: *Steering.tech*. Garching: TÜV Süd 2008

Neukum, A.; Mehrjerdian, E.; Greul, R.; Gaedke, A.: Einflussfaktor Fahrzeug - Zur Übertragbarkeit von Aussagen über die Wirkung von Zusatzlenkmomenten. In: *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme 26.VDI/VW-Gemeinschaftstagung*. VDI-Berichte 2104. Düsseldorf : VDI-Verlag 2010

Neukum, A.: Controllability of Erroneous Steering Torque Interventions: Driver Reactions and Influencing Factors. In: *chassis.techplus*. Garching : TÜV Süd 2010

Norm ISO 7401: Road vehicles — Lateral transient response test methods — Open-loop test methods, 2003

Popper, K. R.; Keuth, H.: Logik der Forschung. 11. Auflage. Tübingen: Mohr Siebeck 2005. ISBN 3-16-148410-X

Rauner, H.: Hard- und Software-Zuverlässigkeit von Steuergeräten für die Aktive Hinterachskinematik. In: Wallentowitz, H. (Hrsg. Bd.) *Allradlenksysteme bei Personenkraftwagen - Referate der Fachtagung "Allradlenksysteme bei Personenkraftwagen" vom 28./29. November 1989 im Haus der Technik, Essen*. Braunschweig [u.a.]: Vieweg1991. ISBN 3-528-06399-8

Redlich, P.: Objektive und subjektive Beurteilung aktiver Vierradlenkstrategien. Aachen: Shaker 1994. ISBN 3-8265-0043-1

Reimpell, J.: Fahrwerktechnik: Grundlagen. 3. Auflage. Würzburg: Vogel 1995. ISBN 3-8023-1507-3

Rönitz, R.; Braess, H.; Zomotor, A.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen - Teil 1. Automobil-Industrie, (1977), Nr. 1, S. 29-39

Sano, S.; Furukawa, Y.; Oguchi, Y.: The Effect of Improved Vehicle Dynamics on Drivers' Control Performance. In: *Proceedings of 7. International Technical Conference on Experimental*. Paris, 1979, S. 864-876

Sano, S.; Furukawa, Y.; Shiraishi, S.: Four Wheel Steering System with Rear Wheel Steer Angle Controlled as a Function of Steering Wheel Angle. In: *SAE Paper* Nr. 860625 (1986)

Schiebahn, M.; Zegelaar, P.; Hofmann, O.: Yaw Torque Control for Vehicle Dynamics Systems. In: *Reifen - Fahrwerk - Fahrbahn. VDI-Berichte 2014*. Düsseldorf: VDI-Verlag 2007, S. 101-119

Schmidt, G.; Kiss, M.; Swtkes, J.; Gerde, C.: Auswirkung haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug System. In: Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig e.V. (Hrsg. Bd.) *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig: GZVB. ISBN 978-3-937655-11-6

Schmidt, G.: Wann spürt der Fahrer überhaupt? In: *Fahrer im 21. Jahrhundert. VDI-Berichte 2015*. Düsseldorf: VDI-Verlag 2007. ISBN 3-18-092015-3, S. 15-27

Schmidtke, H.; Bernotat, R.: *Ergonomie*. 3. Auflage. München [u.a.]: Hanser 1993. ISBN 3-446-16440-5

Schneider, B.: Konzipierung einer marktgerechten Stelleinheit als Aktuator einer aktiven Hinterradlenkung für Personenkraftwagen. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen 1995

Schneider, K.; Goris, A.; Bergner, H.: *Bautabellen für Architekten*. 18. Auflage. Neuwied: Werner 2008. ISBN 9783804152373

Sharp, R. S.; Crolla, D. A.: Controlled Rear Steering for Cars - A Review. In: Institution of Mechanical Engineers. In: *International Conference of Advanced Suspensions*. 1988, S. 149-163

Silbernagl, S.; Despopoulos, A.; Gay, W.: *Taschenatlas der Physiologie. Flexibles Taschenbuch, MED*. 4. Auflage. Stuttgart [u.a.]: Thieme 1991. ISBN 3-13-567704-0

Stamer, N.: Ermittlung optimaler PKW-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung. VDI-Fortschritt Berichte Reihe 12 Nr. 302. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997. ISBN 3-18-330212-8

Takiguchi, T.; Yasuda, N.; Furutani, S.; Kanazawa, H.; Inoue, H.: Improvement of Vehicle Dynamics by Vehicle-Speed-Sensing Four-Wheel Steering System. SAE-Paper Nr. 860624, (1986)

The RESPONSE 3 development group: *Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS*. URL:http://www.prevent-ip.org/download/deliverables/RESPONSE3/D11.2/Response3_CoP_v3.0.pdf.- Aktualisierungsdatum: 2.8.2010.

Theis, I.: Das Steer-by-Wire System im Kraftfahrzeug - Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit. Dissertation. München: Technische Universität München 2002.

Thomaske, W.; Fortmüller, T.; Lach, B.; Maywerk, M.: Ein neuartiges Bewegungssystem für "On-" und "Offroad" Fahrsimulationen. In: *Motion Simulator Conference*. Braunschweig: GZVB 21.-22.09.2005

Ullmann, S.; Heißing, B.: Der Normalfahrer als Messgröße für die Optimierung und Absicherung aktiver fahrdynamischer Regelsysteme. In: TÜV-Akademie und TU München (Hrsg. Bd.) Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. München: 04.-05. April 2006

Unbehauen, H.: Regelungstechnik I. 12. Auflage. Braunschweig: Vieweg 2002. ISBN 3-528-11332-4

Weir, D.; DiMarco, R.: Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data, SAE-Paper Nr. 780010, (1978)

Wesp, A.; Schmidt, D.; Fecher, N.; Winner, H.: Vehicle Motion In Case Of Failure of Superposition Steering Systems. In: TÜV-Süd (Hrsg. Bd.) Steering.tech. Garching, 31. März-1. April 2008

Wesp, A.; Stoff, A.; Winner, H.: Der Einfluss der Systemauslegung hinterachsgelenkter Fahrzeuge auf die Bewertung von Fahrern im Makrosinusversuch. In: Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn. VDI-Berichte Nr. 2086. Düsseldorf: VDI-Verlag 2009

Wesp, A.; Stoff, A.; Winner, H.: Die Systemauslegung von hinterachsgelenkten Fahrzeugen als Einflussgröße auf die Fahrerbewertung im Makrosinusversuch und Spurwechsel. In: Haus der Technik (Hrsg. Bd.) Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen IV. Essen, 12.-13. November 2009

Whitehead, J.: Four Wheel Steering: Maneuverability and High Speed Stabilization. SAE-Paper Nr. 880642, (1988)

Yamaguchi, H.; Osawa, M.; Iwama, N.; Yamamoto, M.: The Estimation of Ambiguous Change in 4WS Control System Using Failure Detection Filter. SAE-Paper Nr. 940978, (1994)

Zomotor, A.: Fahrwerktechnik: Fahrverhalten. Würzburg: Vogel Buchverlag 1991

van Zanten, A.; Erhardt, R.; Landesfeind, K.; Pfaff, G.: Beherrschung der Querdynamik von Kraftfahrzeugen durch Bremseneingriff; VDI Fortschritt-Berichte Nr. 405 (19. Internationales μ -Symposium). Düsseldorf: VDI-Verlag 1999

Studentische Arbeiten

Basile, E. : Experimentelle Ermittlung der Fahrzeugreaktion bei Fehlereingaben durch aktiver Lenksysteme, Darmstadt, 2007, Studienarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - SA 935/07

Claus, S. : Parameteranpassung eines Fahrzeugmodells durch Optimierungsalgorithmen, Darmstadt, 2008, Studienarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - SA 954/08

Dziubek, N. : Entwicklung eines Fahrzeugmodells zur Bewertung des Einflusses der Aktordynamik und Sensoreigenschaften auf bekannte Hinterradverstellstrategien, Darmstadt, 2007, Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - DA 417/06

Jakob, M. : Identifikation der Sensitivität von Fahrern bezüglich unterschiedlichen Gier- und Querschleunigungsaufbaus im Fahrversuch, Darmstadt, 2008, Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - DA 441/08

Klimkeit, B. : Entwicklung von Basisfunktionen einer dynamischen Hinterradverstellung, Darmstadt, 2006, Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - DA 408/06

Kopfer, J. : Störungsbewertung aktiver Lenksystemen im Closed-Loop Versuch, Darmstadt, 2008, Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - DA 447/08

Krause, P. : Identifikation der Wahrnehmungsschwelle der Zeitverzögerungen zwischen der Gier- und Querschleunigung im Fahrversuch, 2008, Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - DA 440/08

Kraus, M. : Identifikation einer Lenkstrategie eines hinterradgelenkten Fahrzeugs, Darmstadt, 2008, Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - DA 448/08

Simmermacher, D. : Erweiterung eines linearen Einspurmodells zur Potentialabschätzung einer Hinterradverstellung, Darmstadt, 2006, Studienarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - SA 917/06

Seitz, C. : Verfahren zur Fehlerdiagnose in Versuchsmessungen unter Nutzung der analytischen Redundanz, Darmstadt, 2008, Bachelor Thesis Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - BTh 968/08

Uhrner, T. : Experimentelle Ermittlung der Störung der Fahrzeugbewegung bei Ausfall aktiver Lenksysteme, Darmstadt, 2008, Studienarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - SA 969/08

v.Schnakenburg, N. : Experimentelle Ermittlung von Basisfunktionen einer quasistatischen Hinterradverstellung, Darmstadt, 2006, Studienarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - SA 912/06

Weitzel, A. : Einfluss von Hinterradverstellstrategien auf die Fahrdynamik, Darmstadt, 2007, Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - DA 431/07

Östreich, M. : Analyse und Nachweis der Potenziale aktiver Lenksysteme, Darmstadt, 2007, Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik - DA 425/07